POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA – INŻYNIERIA MECHANICZNA DZIEDZINA NAUK – NAUKI INŻYNIERYJNO – TECHNICZNE

Rozprawa doktorska

mgr inż. Artur Mościcki

Mechanizm zniszczenia materiałów komórkowych wykonanych ze spienionego szkła

> **Promotor:** dr hab. inż. Piotr Marek, prof. uczelni

> > Promotor pomocniczy:

dr inż. Jakub Pawlicki

WARSZAWA 2023

Chciałem serdecznie podziękować:

śp. dr inż. Janisławowi Zwolińskiemu za zaszczepienie pasji do badań i nauki,

dr hab. inż. Piotrowi Markowi za cierpliwość i motywowanie do pracy,

dr inż. **Jakubowi Pawlickiemu** za bycie mentorem naukowym i życiowym, na którego wsparcie zawsze mogłem liczyć niezależnie od sytuacji.

Dziękuję również wszystkim, którzy byli ze mną, pomagali i motywowali do zakończenia tej rozprawy.

Streszczenie

Niniejsza rozprawa dotyczy zagadnienia wytrzymałości materiału komórkowego w postaci spienionego szkła w warunkach prostych i złożonych obciążeń mechanicznych i termicznych.

W pracy przedstawiono modele przestrzenne struktury materiałów porowatych a następnie, dla wybranej, regularnej i adekwatnej geometrii komórki, opisano model analityczny dla przypadku komórki otwartej i proponowany model numeryczny MES (metoda elementów skończonych) dla komórki o strukturze zamkniętej. Zbudowano trójwymiarowy model MES powtarzalnego fragmentu struktury spienionego szkła dla zagadnień strukturalnych i termicznych.

Przeprowadzono serię testów wytrzymałościowych na próbkach ze spienionego szkła dla różnych wariantów podparcia i obciążenia struktury. Wykorzystując technikę cyfrowej korelacji obrazu (DIC) zbadano proces deformacji i rozwoju uszkodzenia struktury spienionego szkła. W ten sposób określono wpływ sposobu wprowadzenia obciążeń w strukturę na jej wytrzymałość i przebieg procesu niszczenia. Na tej podstawie sformułowano wnioski i zalecenia praktyczne dotyczące preferowanych metod projektowania i wykonywania powierzchni i podłoży oddziaływujących mechanicznie ze spienionym szkłem. Ustalono, jakiego rodzaju sposób podparcia jest niekorzystny i powinno się go unikać w trakcie procesu projektowania konstrukcji z zastosowaniem tego materiału. Badania eksperymentalne posłużyły do weryfikacji obliczeń modelowych MES. Przeprowadzono również pomiary ciśnienia gazu uwięzionego wewnątrz struktury, stwierdzając znaczący rozrzut jego wartości.

Wykorzystując zbudowane modele MES zbadano numerycznie mechanizm zniszczenia spienionego szkła i poddano dyskusji wprowadzenie obciążeń w strukturę piany, wskazując sposób zwiększający jej nośność. Korzystając ze zbudowanych modeli MES przeprowadzono również symulacje nieustalonej wymiany ciepła oraz odporności struktury na szoki cieplne.

Stosując lokalnie dla szkła kryteria wytrzymałościowe Galileusza-Rankine'a i Mohra wyznaczono obwiednie stanów granicznych piany szklanej w złożonych stanach obciążeń mechanicznych z uwzględnieniem płaskiego stanu naprężenia i przypadku trójwymiarowego. Wykazano zmniejszenie efektu asymetrii właściwości wytrzymałościowych struktury spienionego szkła wobec materiału litego co wynika ze znacznego udziału efektów zgięciowych w strukturze komórkowej.

Przenalizowano wpływ ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury piany na jej wytrzymałość w trakcie pracy w podwyższonych temperaturach, uwzględniając wpływ zmiany wartości tego ciśnienia. W przypadku szoków cieplnych wskazano potencjalne mechanizmy, które mogą doprowadzić do przerwania ciągłości materiału.

Przeprowadzone badania pozwalają lepiej zrozumieć fizykę procesu niszczenia struktury spienionego szkła i dostarczają cennych wskazówek, dzięki którym będzie można w sposób optymalny projektować konstrukcje z zastosowaniem tego materiału.

Słowa kluczowe: analizy numeryczne MES, materiały komórkowe, materiały porowate, spienione szkło, szoki cieplne, nośność graniczna, hipoteza Mohra, hipoteza Rankine'a

Summary

Thesis is related to the material strength of cellular solid (foamed glass) under simple and complex mechanical and thermal loads.

In the paper geometrical models of the porous structures were presented. Description of the analytical solution for foam with open cell and numerical solution based on FE model for foam with closed cells is presented. FE model of three-dimensional regular, periodic structure of the foamed glass for structural and thermal analysis was built.

A series of strength tests was carried out on foamed glass samples for various support and load implementation. Using the technique of digital image correlation (DIC), the process of deformation and damage development of the foamed glass structure was investigated. Based on that the mechanism of the destruction process was determined and then the impact of the method of loads implementation on the overall strength too. On this basis, conclusions and recommendations regarding to design process for foamed materials were formulated. It has been established which type of support is unfavorable and should be avoided for this material. Experimental studies were used to verify FEM model calculations. Measurements of the pressure of gas captured inside the structure were also carried out, finding a significant scatter of its values.

Using the FEM models, the mechanism of foamed glass destruction was numerically examined and the effect of the method of load application into the foam structure was discussed, indicating the most optimal way to increase the load capacity. Simulations of transient heat transfer and structure resistance to thermal shocks were also carried out using the FEM models.

Using the Mohr's and Rankine's hypothesizes for local stress distribution the envelopes of the limit load for formed glass under complex loading were determined, taking into account the plane stress state and the three-dimensional case. The effect of the asymmetry of strength properties of the foamed glass structure against the solid material was shown to be reduced, which results from a significant share of bending effects in the cellular structure.

The effect of the closed gas pressure inside the foam structure on its strength during operation at elevated temperatures was analyzed, taking into account the effect of changes in the value of this pressure due to the increase of temperature. In the case of thermal shocks, potential mechanisms that can lead to lose of material continuity have been identified.

The conducted research allows for a better understanding the physics of the destruction process of the foamed glass and provides valuable tips, which allow to design more optimal construction using this material.

Keywords: FEM numerical analyses, cellular materials, porous materials, foamed glass, thermal shocks, limit load capacity, Mohr's hypothesis, Rankine's hypothesis

Spis treści

Oz	Oznaczenia				
1.	Wprowadzenie				
2.	Cel i zakres pracy				
3.	Wytrzymałość materiałów komórkowych				
	3.1. Definicja oraz klasyfikacja materiałów komórkowych				
	3.2. Wytwarzanie materiałów komórkowych				
	3.3. Właściwości materiałów komórkowych				
	3.4. Zastosowanie materiałów komórkowych				
	3.5. Wpływ niedoskonałości struktury na właściwości materiałów porowatych				
	3.6. Hipotezy wytrzymałościowe				
4.	Modele struktury materiałów porowatych41				
	4.1. Model przestrzenny struktury				
	4.2. Model analityczny struktury				
	4.3. Model numeryczny struktury 49				
	4.3.1. Podstawowe założenia MES49				
	4.3.2. Model numeryczny MES50				
5.	Badania eksperymentalne				
	5.1. Cyfrowa korelacja obrazu				
	5.2. Próba osiowego ściskania z uwzględnieniem różnych warunków podparcia 57				
	5.3. Pomiar ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury spienionego szkła				
6.	Wyniki analiz numerycznych74				
	6.1. Mechanizm zniszczenia spienionego szkła oraz optymalizacja metody wprowadzenia siły do układu				
	6.1.1. Oszacowanie wpływu ciśnienia gazu w porach na możliwość zniszczenia struktury spienionego szkła 74				
	6.1.2. Oszacowanie wpływu wprowadzenia obciążenia na możliwość zniszczenia struktury spienionego szkła				
	6.1.3. Bezpieczeństwo struktury spienionego szkła z uwzględnieniem sposobów podparcia i ciśnienia gazu				
	6.2. Zagadnienie nieustalonej wymiany ciepła oraz odporności struktury na szoki cieplne				
	6.2.1. Analiza wpływu szoków cieplnych92				
	6.2.2. Analiza wpływu ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury piany na jej				
	wytrzymałość w trakcie pracy w podwyższonych temperaturach102				
	6.3. Obwiednia stanów niszczących dla struktury spienionego szkła 107				
7.	7. Podsumowanie				
8.	8. Bibliografia116				

Oznaczenia

α	liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej [C ⁻¹]
Е	odkształcenie [‰]
θ	stała Poissona [-]
λ	przewodność cieplna [W(mK) ⁻¹]
ρ	gęstość [kg m ⁻³]
σ	naprężenie [MPa]
σ_B	stała Boltzmanna - 5,6644·10 ⁻⁸ [W/m ² K ⁴]
A	pole powierzchni [mm ²]
С	ciepło właściwe [J(kg K) ⁻¹]
D	średnica [mm]
E	moduł Younga [MPa]
F	siła [N]
G	moduł Kirchhoffa [MPa]
h	wysokość [mm]
k	współczynnik koncentracji naprężeń [-]
L	długość [mm]
т	masa [kg]
п	liczba moli [mol]
р	ciśnienie [bar]
Р	porowatość [%]
R	uniwersalna stała gazowa - 8,31446261815324 [Jmol ⁻¹ ·K ⁻¹]
R_c	wytrzymałość na ściskanie [MPa]
R_r	wytrzymałość na rozciąganie [MPa]
Т	temperatura [°C]
t	czas [s]
U	współczynnik wnikania ciepła [W(m ² K) ⁻¹]
V	objętość [mm ³]
Q	ciepło [J]

1. Wprowadzenie

Postęp techniczny i cywilizacyjny nierozłącznie związany jest z rozwojem materiałów oraz umiejętnością ich zastosowania. Odzwierciedla to nazewnictwo okresów prehistorycznych oraz historycznych. Są nimi kolejno epoki: kamienia, brązu i żelaza (rys. 1.1). Każda z wymienionych epok swoją nazwę bierze od materiału, którego wprowadzenie spowodowało znaczącą zmianę technologiczną. Podczas tej drogi ludzkość przeszła od etapu ludu zbieraczy, poprzez rozwój rolnictwa do zawansowanych starożytnych cywilizacji, które były w stanie konstruować gigantyczne budowle. Odwołania do podziału epok z wykorzystaniem nazw materiałów można zaleźć również w literaturze. Przykładem może być mit o Prometeuszu. W dziele tym historia ludzkości została podzielona na cztery okresy: wiek złoty, srebrny, miedziany i żelazny. Każda epoka związana jest ze znaczącą zmianą w życiu ludzi. We wspomnianym micie, wraz z postępem czasu, następuje powolna degradacja ludzkości i związany z nią jej upadek. W prawdziwym świecie, odwrotnie, wraz z upływem czasu można zauważyć rozwój kulturowy i techniczny. Żelazo, pomimo odkrycia w czasach starożytnych, dalej jest jednym z podstawowych materiałów konstrukcyjnych powszechnie stosowanych w technice. Głównym elementem zmiany jest dodanie do żelaza węgla. Ze stopu tych pierwiastków otrzymujemy nowy lepszy stop – stal. Wraz z postępem czasu obserwujemy dynamiczny rozwój nowych materiałów.



Rys. 1.1. Podział epok historycznych ze względu na wykorzystanie materiałów [1]

XX wiek odznaczał się nagłym skokiem w dziedzinie rozwoju materiałów. Dwie wojny o zasięgu światowym, a następnie zimnowojenna konfrontacja Stanów Zjednoczonych ze Związkiem Radzieckim (uwzględnić tu należy również wyścig kosmiczny) wymusiły znaczący wzrost nakładów na rozwijanie nowych technologii. Ekstremalne warunki pracy (skrajnie zmienne temperatury pracy, duże przeciążenia oraz prędkości) zaowocowały opracowaniem nowych, lepszych stopów metali: niklu, aluminium oraz tytanu. Kolejnym znaczącym krokiem było wytworzenie kompozytów polimerowo-węglowych oraz polimerowo-szklanych. Wysoka sztywność oraz niewielka ich gęstość pozwala na obniżenie masy konstrukcji, dlatego są one tak powszechnie stosowane w lotnictwie, gdzie redukcja masy własnej statku powietrznego pozwala na zwiększenie ilości paliwa lub ładunku jaki można zabrać zwiększając zasięg lub

rentowność przelotu. Dążenie do uzyskania wysokiej wytrzymałości przy niskim ciężarze własnym konstrukcji w tej dziedzinie skłania projektantów do stosowania struktur cienkościennych o charakterze skorupowym lub półskorupowym, w których zagadnienia lokalnej sztywności poprzecznej (giętnej) i stateczności stają się istotne. Rozwiązanie daje wówczas konstrukcja przekładkowa pokrycia (ang. sandwich), w której warstwy strukturalne (metalowe, kompozytowe lub inne) rozdzielone są bardzo lekką warstwa korowa, której zadaniem jest rozsunięcie okładek dla zwiększenia sztywności poprzecznej struktury i przeniesienie obciążeń ścinających. Warstwy korowe wykonuje się ze struktur ulowych (typu plaster miodu – ang. Honeycomb), stosowanych od lat 40 XX w. lub materiałów piankowych (np. twarde pianki poliuretanowe). W przypadku kompozytów ważna jest kontrola jakości takiej struktury, co wiąże się z koniecznością ścisłej kontroli procesu produkcji, by uzyskać produkt o powtarzalnych właściwościach. Dodatkowo materiały te mają trochę inne mechanizmy zniszczenia w porównaniu do tradycyjnych metali, gdyż nie występuje w nich łatwo zauważalne płynięcie świadczące o uszkodzeniu. Bardzo często struktura kompozytu ulega uszkodzeniu w jej wnętrzu, przez co nie jest ono wykrywalne gołym okiem. Dlatego konieczne było dokładne zrozumienie mechanizmów powodujących zniszczenie takiej struktury oraz opracowanie metod badawczych w celu powszechnego i bezpiecznego ich stosowania. Rozwinął się cały dział techniki związany z badaniami nieniszczącymi. Wymienić tu można techniki ultradźwiękowe, rentgenowskie (i ich rozwinięcie w postaci tomografii), wiroprądowe oraz penetracyjne. Umożliwiają one wykrycie delaminacji lub pęknięć wewnątrz kompozytu. Metody te są również stosowane do poszukiwania niejednorodności w częściach wykonanych ze stopów metali. Powszechnie za ich pośrednictwem ocenia się jakość połączeń spawanych.

Popularnym kierunkiem rozwoju (poza opracowywaniem nowych materiałów) jest zastosowanie aktualnie istniejących materiałów w nowej formie. Takim podejściem może być spienianie już znanych i dobrze zbadanych materiałów. Materiał spieniony posiada pory wewnątrz swojej struktury; powodują one znaczącą redukcję gęstości takiego wyrobu. Procesowi spienienia można poddać dowolny materiał. Finalne właściwości piany będą zależne od właściwości materiału bazowego jak również od uzyskanej geometrii struktury. Piany produkuje się z metali, szkieł, ceramiki oraz tworzyw sztucznych. Stosować je można jako izolatory, wygłuszenie lub wypełnienie w strukturach kompozytowych. Piany w swojej naturze cechują się małą gęstością. Stosowane są jako izolacja w budownictwie, jak np. pianka poliuretanowa. Spieniony węgiel może być wykorzystany jako wypełniacz komórkowy w kompozytach węglowych, dzięki czemu unikamy różnicy w rozszerzalności cieplnej łączonych ze sobą materiałów, a jednocześnie zapewniona jest wysoka sztywność. Piany, jako struktury które dobrze absorbują energię, stosowane są jako elementy stref zgniotu w karoseriach samochodów lub np. jako materiał stosowany do wyściełania podeszew w butach sportowych.

Zrozumienie zachowania się pian może pozwolić na ich lepsze wykorzystanie oraz wręcz projektowanie ich mikrostruktury. Aktualnie coraz większą popularnością cieszą się techniki przyrostowe, które bazują na dodawaniu materiału w wybranych miejscach wytwarzanej części. Pomimo wielu ograniczeń tej metody, pozwala ona na bardzo dużą kreatywność w kształtowaniu struktury, jak również na wytworzenie obiektu o wcześniej zaplanowanych cechach (np. sterowanie sztywnością i wytrzymałością w wybranych miejscach oraz kierunkach wewnątrz konstrukcji lub też uzyskanie specyficznych właściwości mechanicznych – np. ujemnego współczynnika Poissona, rys. 1.2). Dodatkowo, wykorzystując optymalizację topologiczną, można zyskać na znaczącej redukcji masy tworzonego produktu. Zaletą technik przyrostowych jest dodawanie materiału w postaci skończonych porcji przetopionego surowca, w przeciwieństwie do technik wytwórczych opartych na skrawaniu. Nie ma wówczas strat materiału w postaci wiórów. Energia niezbędna do przetopienia wyrobu może być dostarczana przy pomocy grzałki, wiązki lasera lub wiązki elektronów zależnie od zastosowanej technologii. Zastosowanie druku 3D pozwala na duże oszczędności nakładu energii. Chodzi tu nie tylko o oszczędności finansowe, ale również środowiskowe. Na Ziemi istnieje skończona ilość surowców, którymi ludzkość musi nauczyć się dysponować, by wystarczyły one do momentu możliwości pozyskiwania surowców spoza Ziemi.



Rys. 1.2. Komórka piany o ujemnym współczynniku Poissona powstała z zapadnięcia się dwudziestoczterościanu [2]

Głównym materiałem jaki będzie rozważany w tym opracowaniu jest szkło. Odkrycie szkła i opracowanie technologii jego obróbki nie było oczywiste i łatwe. Znaczącym osiągnieciem technologicznym było wytworzenie temperatury koniecznej do przetopienia krzemionki w celu uzyskania ciała szklistego. Kolejnym wielkim skokiem technologicznym

była obróbka zwierciadeł. Dopracowanie jej pozwoliło na skonstruowanie lunety oraz teleskopu, co przełożyło się na wielkie odkrycia astronomiczne w czasie renesansu. W połowie XX wieku opracowano natomiast metodę przemysłowej produkcji szkła przeznaczonego do okien (ang. floating glass). Znacząco obniżyło to koszt jego produkcji i poprawiło parametry uzyskiwanych szyb okiennych.

W niniejszej pracy podjęty zostanie temat spienionego szkła. W pierwszej kolejności zdefiniowane zostanie pojęcie spienionego szkła oraz omówione zostaną podstawowe właściwości materiału bazowego. W dalszej części rozważania skupią się głównie na zagadnieniach jego wytrzymałości.

Spienione szkło (ang. foamed glass) jest materiałem porowatym produkowanym głównie z odpadów pozyskiwanych z opakowań szklanych. Jego zaletą jako materiału budowlanego jest niewielka waga, wysoka wytrzymałość oraz właściwości termoizolacyjne i akustyczne, dlatego coraz powszechniej stosowany jest on w budownictwie do izolacji płyt fundamentów oraz płaskich dachów [3]. Spienione szkło, podobnie jak materiał bazowy, jest materiałem nieorganicznym, odpornym na korozję biologiczną, na działanie grzybów oraz pleśni, a także na owady i gryzonie. Materiał ten cechuje duża wytrzymałość na ściskanie, która nie ulega pogorszeniu z wiekiem materiału. Komponenty wykonane z tego materiału zachowują również swój kształt wraz z upływem czasu. Dodatkowo jest to surowiec niepalny, odporny na działanie kwasów oraz nieprzepuszczalny dla pary wodnej [4]. Spienione szkło może być produkowane w dwóch wariantach komórek: zamkniętych i otwartych. Spienione szkło o komórkach zamkniętych ma barwę czarną, a jego gęstość wynosi koło 130 kg/m³ (główne zastosowanie izolacja termiczna). Natomiast piana szklana o komórkach otwartych ma kolor biały a jej gęstość wynosi około 300 kg/m³ (główne zastosowanie izolacja akustyczna). Zastosowanie techniczne w budownictwie ma głównie szkło o barwie czarnej. Wynika to z jego niewielkiej gestości oraz zamkniętych porów, dzieki czemu zapewnia znacznie lepsza izolacje termiczna. Zaletą jest również to, że pianka taka jest nienasiąkliwa, a jej parametry nie ulegają zmianie w wyniku działania wody. Dodatkowym atutem jest też niewielka energochłonność procesu produkcji tego materiału (80 kW na metr sześcienny) w porównaniu do innych materiałów izolacyjnych, np. styropianu (2000 kW na metr sześcienny) [3]. Dlatego promowany jest przez ekologów, zwłaszcza że koszt wykonania izolacji ze styropianu (uwzględniając konieczność zastosowania dodatkowych warstw z innych materiałów) i spienionego szkła są ze sobą porównywalne [3]. Spienione szło produkuje się z odpadów szklanych poprzez ogrzewanie mieszaniny granulowanego szkła i środka spieniającego (takiego jak wegiel lub wapień).

W pobliżu temperatury topnienia szkła czynnik spieniający zmienia swój stan skupienia w gaz, powodując w szkle efekt pienienia. Po schłodzeniu powstała struktura twardnieje zachowując swój kształt. Dokładny opis procesu tworzenia materiałów piankowych zostanie przedstawiony w rozdziale 3.2.

Głównym surowcem wykorzystywanym do spieniania szkła jest materiał pozyskany z recyclingu odpadów pochodzących z opakowań. Oznacza to, że nieznane jest pochodzenie oraz skład surowca bazowego. Każda huta może produkować szkło według swojego własnego przepisu. Powoduje to dodatkowe problemy związane z rozrzutem właściwości materiałowych spienionego szkła. Najpowszechniej wytwarzanym typem szkła jest szkło wapienno-sodowe. Stanowi ono 90% światowej produkcji. Szkło jest materiałem amorficznym – nieposiadającym struktury krystalicznej (uporządkowania dalekiego zasięgu), w którym cząsteczki ułożone są w sposób przypadkowy (rys. 1.3). Rozmieszczenie elementów sieci przestrzennej szkła przypomina rozmieszczenie cząsteczek w cieczy lub gazie. Amorficzna struktura szkła powstaje w wyniku przetopienia przygotowanych składników, a następnie szybkiego ochłodzenia płynu do postaci stanu stałego z pominięciem etapu krystalizacji.



Rys. 1.3. Struktura szkła wapienno-sodowego na poziomie atomowym

Czasami szkło określa się mianem cieczy przechłodzonej. Wyrażanie to jednak nie jest prawidłowe, ponieważ ciecz przechłodzona to taka, której temperatura jest poniżej temperatury krystalizacji, ale pozostaje płynna i jej molekuły mogą się przemieszczać wewnątrz niej. Szkło posiada wszystkie cechy ciała stałego, pomimo że nie posiada uporządkowania dalekiego zasięgu. Z punktu widzenia termodynamiki taka postać struktury jest nietrwała, ponieważ stan energetyczny sieci krystalicznej jest znacznie niższy w porównaniu do struktury amorficznej. Z tego powodu szkło dąży do uzyskania struktury krystalicznej, jednak z powodu zbyt dużej lepkości oraz szybkiego tempa chłodzenia nie jest w stanie jej uzyskać. Jest to niezwykle ciekawe, ponieważ dwutlenek krzemu (główny składnik szkła) w naturze występuje w postaci kryształu – kwarcu. Rysunek 1.4 prezentuje typowy krzemowo-tlenowy czworościan, z którego w głównej mierze zbudowana jest skorupa ziemska. Atomy krzemu łączą się z atomami tlenu bardzo silnymi wiązaniami kowalencyjnymi. Rysunek 1.5 prezentuje natomiast rozwiniętą strukturę zbudowaną z krzemianu (SiO₄). Tlenki metali dodawane do szkła w trakcie procesu produkcji działają jako modyfikatory sieci struktury. Tlenek sodu (Na2O) dodany do szkła powoduje, że każdy jon (kation) sodu (Na+) przyłącza się do jonu (anionu) tlenu w czworościanie, zmniejszając w ten sposób sieciowanie struktury (rys. 1.3), jak pokazano na rys. 1.5. Efektem dodania tlenku sodu jest więc zastąpienie niektórych wiązań kowalencyjnych wiązaniami jonowymi o niższej energii. Przekłada się to na zmniejszenie lepkości mieszaniny. Dzięki temu szkło sodowo-krzemowe można łatwo obrabiać już w temperaturze 700°C, podczas gdy czysty SiO₄ mięknie dopiero w temperaturze 1200°C.



Rys. 1.4. Wiązania kowalencyjne pomiędzy atomami krzemu i tlenu Si-O-Si [5]



Rys. 1.5. Rozwinięta struktura zbudowana z czworościanu krzemowo-tlenowego [6]

Tabela 1.1 przedstawia typową kompozycję substratów dla tego materiału. Skład materiału może się różnić w zależności od zastosowanego przez producenta szkła. Różnice w składzie przekładają się również na właściwości mechaniczne i wytrzymałość finalnego produktu.

Tabela 1.1. Skład szkła wapielnio-sodowego [7]		
Składnik	Udział masowy (%)	
Dwutlenek krzemu (SiO ₂)	72,7	
Tlenek sodu (Na ₂ O)	13	
Tlenek wapnia (CaO)	8,8	
Tlenek magnezu (MgO)	4,3	
Tlenek glinu (III) (Al ₂ O ₃)	0,6	
Tlenek potasu (K ₂ O)	0,4	
Tritlenek siarki (SO ₃)	0,2	
Tlenek żelaza (III)/hematyt (Fe ₂ O ₃)	0,02	

Tabela 1.1. Skład szkła wapienno-sodowego [7]

Tabela 1.2 prezentuje podstawowe właściwości mechaniczne (w tym termiczne) szkła wapienno-sodowego. Podaje też temperaturę mięknięcia szkła – jest to temperatura, w której materiał-szkło zaczyna przechodzić ze stanu ciała stałego w plastyczną masę. Temperaturę tę definiuje się zazwyczaj dla ciał o strukturze amorficznej lub amorficzno-krystalicznej, ponieważ ciała takie nie posiadają temperatury topnienia. Ze względu na dużą lepkość oraz szybkie tempo chłodzenia w trakcie procesu produkcji nie dochodzi do wytwarzania się struktury krystalicznej i z tego powodu nie ma przemiany z cieczy w strukturę krystaliczną. Temperatura odprężania natomiast jest temperaturą, w której dochodzi do usunięcia naprężeń powstałych w trakcie procesu wytwarzania szkła. Ze względu na małe przewodnictwo cieplne proces stygnięcia gotowej masy jest bardzo nierównomierny. Warstwy zewnętrzne stygną znacząco szybciej niż wewnętrzna część i ulegają skurczowi. W tej warstwie pojawiają się naprężenia rozciągające. W konsekwencji w warstwach środkowych pojawią się naprężenia ściskające, które są wymuszone przez kurczenie się warstw zewnętrznych. Jeśli wartość tych naprężeń przekroczy wytrzymałość materiału rodzimego, mogą one spowodować pęknięcie gotowego produktu. Naprężenia te mogą mieć charakter trwały lub przejściowy. Proces odprężania szkła przeprowadzany jest w specjalnych piecach. Celem tego procesu jest polepszenie właściwości mechanicznych wytwarzanych produktów.

Właściwości mechaniczne		
Gęstość	2 500 kg m ⁻³	
Moduł sprężystości (Younga)	72 GPa	
Moduł sprężystości poprzecznej (Kirchhoffa) (GPa)	30 GPa	
Moduł odkształcalności objętościowej (Helmholtza) (GPa)	43 GPa	
Współczynnik Poissona (-)	0,23	
Przewodność cieplna	0,937 W(mK) ⁻¹	
Ciepło właściwe	0,88 kJ(kg K) ⁻¹	
Współczynnik rozszerzalności liniowej	8,3·10 ⁻⁶ °C ⁻¹	
Temperatura mięknięcia	715°C	
Temperatura odprężania	548°C	

 Tabela 1.2. Właściwości mechaniczne szkła wapienno-sodowego [7]

Tabela 1.3 przedstawia wytrzymałość szkła wapienno-sodowego w zależności od wykonanej obróbki termicznej. Z przedstawionych danych wyraźnie widać znaczący rozrzut wytrzymałości szkła. Naprężenia, przy jakich dojdzie do uszkodzenia połowy próbek, są ponad dwa razy większe w stosunku do naprężeń, dla których istnieje prawdopodobieństwo uszkodzenia 0,8%. Aby lepiej zobrazować rozrzut wytrzymałości szkła, na rys. 1.6 przedstawiono krzywą zaczerpniętą z [8]. Odczytać z niej można, że wytrzymałość na rozciąganie szkła może wahać się od 14 ksi do 29 ksi w zależności od badanej próbki. W celu poprawy wytrzymałości szkła na rozciąganie stosuje się ulepszanie cieplne i hartowanie. Procesy te polegają na wytworzeniu wewnątrz struktury szkła wstępnych naprężeń ściskających. W obu przypadkach szkło wygrzewane jest do porównywalnej temperatury. Główną różnicą pomiędzy procesami jest znacznie szybsze chłodzenie szkła w przypadku hartowania w porównana do ulepszenia cieplnego szkła. Szybsze tempo chłodzenia powoduje powstanie znacznie większych naprężeń ściskających.

Typ obróbki cieplnej szkła	Wytrzymałość na zerwanie (prawdopodobieństwo uszkodzenia 50%)	Naprężenia dopuszczalne (prawdopodobieństwo uszkodzenia 0.8%)
Odprężone	41 MPa	19 MPa
Ulepszane cieplnie	83 MPa	39 MPa
Hartowane	165 MPa	77 MPa

Tabela 1.3. Wytrzymałość szkła wapienno-sodowego [7]

Proces wytwarzania szkła zależy od wielu zmiennych. Właściwości gotowego produktu zależeć mogą od: doboru odpowiednich substratów (ilości i rodzaju), procesu wytopu (temperatury oraz czasu syntezy), a nawet materiału samego tygla wykorzystanego do syntetyzowania szkła [9]. Tak duża mnogość czynników od jakich zależeć mogą końcowe właściwości powoduje znaczący ich rozrzut. Przekłada się to również na właściwości mechaniczne struktury spienionego szkła. Duża niepewność danych materiałowych utrudnia ustalenie zachowania się samej struktury podczas jej obciążania. W literaturze ([10]) – zaleca się by w przypadku szkła wytrzymałość została ograniczona do 7 MPa. Ma to na celu uwzględnienie wszystkich imperfekcji wpływających na wytrzymałość szkła (możliwych zarysowań, mikropęknięć, zanieczyszczeń i innych). Na podstawie pracy [11] można określić stosunek pomiędzy dopuszczalnymi nieprężeniami na rozciąganie i ściskanie dla szkła równy 0,056. Biorąc następnie z tabeli 1.3 dopuszczalne naprężenia dla rozciągania, wynoszące 19 MPa, można przyjąć dopuszczalne naprężenia ściskające jako 338 MPa.



Rys. 1.6. Rozkład naprężeń zrywających dla szkła sodowo-wapiennego w temperaturze 170°C [8]

Spienione szkło jako izolator pracuje w podwyższonych temperaturach. Zmiana temperatury pracy wpływa również na właściwości spienionego szkła. Wraz ze wzrostem jego temperatury szkło staje się mniej sztywne – następuje spadek modułu Younga ([12,13]). Wpływa to również na wytrzymałość szkła. W temperaturze 100 °C osiąga ono swoje minimum wytrzymałości na rozciąganie (26.6 MPa uśredniona wartość otrzymana w trakcie badań eksperymentalnych [14]). Po przekroczeniu temperatury 100 °C wytrzymałość szkła na rozciąganie zaczyna wzrastać. Rysunek 1.7 przestawia zależność uśrednionych, niszczących

naprężeń rozciągających w funkcji temperatury dla szkła, uzyskanych na drodze badań eksperymentalnych. Przerywana linia prezentuje wyniki uzyskane we wstępnej fazie badań. W ich trakcie zauważono znaczącą zmianę wytrzymałości szkła w temperaturze około 100°C. Dlatego przeprowadzono dodatkowe próby wytrzymałościowe, aby lepiej zbadać ten obszar temperatur. Wyniki uzyskane z kolejnych prób wytrzymałościowych prezentuje ciągła linia.



Rys. 1.7. Zależność krytycznych naprężeń rozciągających dla szkła w funkcji temperatury [14]

Tabela 1.4 zawiera zestawienie właściwości mechanicznych gotowego produktu, jakim jest spienione szło. Wymienione właściwości pochodzą z karty katalogowej dostępnej na stronie producenta płyt wykonanych ze spienionego szkła przeznaczonych do izolacji płyt fundamentowych oraz dachów. Wytrzymałość na ściskanie wyznaczona została zgodnie z wytycznymi normy EN 826 załącznik A. Zgodnie z nią badanie powinno zostać przeprowadzone pomiędzy dwiema płaskimi, równoległymi powierzchniami. Jedna z tych płyt powinna być zaopatrzona w przegub kulowy, pozwalający na samodopasowanie się w celu zapewnienia równego nacisku. Badana próbka powinna mieć grubość zgodną z finalnym produktem oraz pory wypełnione bitumem typu R85/25. Wytrzymałość na rozciąganie określona została zgodnie z normą EN 1607.

Parametr		
Grubość en 823	40-200 ^{± 2} mm	
Gęstość en 1602	$130^{\pm 10\%} kg m^{-3}$	
Wytrzymałość na ściskanie EN 826-A	≥900 kPa	
Wytrzymałość na rozciąganie EN 1607	≥ 200 kPa	
Przewodność cieplna EN ISO 10456	\leq 0,045 W (mK) ⁻¹	
Dyfuzyjność termiczna w 0°C	$4,1 \ 10^{-7} \ \mathrm{m}^2 \ \mathrm{s}^{-1}$	

Tabela 1.4. Specyfikacja wyrobu spienionego szkła: FOAMGLAS® floor board S3 [15]

Jak już wspomniano szkło spienione jest stosowane jako izolator w budownictwie (izolacja dachów oraz płyt fundamentowych). Pomimo powszechnego wykorzystywania tego materiału dostępna jest niewielka liczba prac badawczych dotyczących właściwości mechanicznych i mechanizmu zniszczenia dla tego materiału. Bai, wraz z zespołem, w swojej pracy [16] badał proces produkcji spienionego szkła otrzymanego z odpadów szklanych z domieszką popiołu lotnego. Stwierdzili, że materiał ma strukturę złożoną z zamkniętych komórek o gęstości właściwej równej 267,2 kg m⁻³. Zespołowi udało się zbadać wytrzymałość na ściskanie uzyskanej struktury, wynosiła ona 0,9829 MPa. W badaniu wykorzystano próbki o wymiarach 32x32x24mm, a w trakcie testu zastosowano warstwę gąbki w celu równomiernego rozłożenia nacisku. Guo oraz pozostali współautorzy publikacji [17] przygotowali pianę o dużej wytrzymałości z odpadów po lampach kineskopowych. Badania wytrzymałościowe wytworzonego spienionego szkła wykazały wartości wytrzymałości na ściskanie od 5,61 do 23,73 MPa. Znaczące różnice uzyskane w trakcie prób wytrzymałościowych wynikały z różnic w składzie badanych próbek. Na podstawie wykonanych testów stwierdzono, że wytrącenia mikrokryształów (Pb, Pb₃O₄ oraz Al₆Si₂O₁₃), powstających w procesie spiekania, znacząco poprawiają wytrzymałość mechaniczną tego materiału. W publikacji [18] przygotowanej przez Chen i in. analizowano natomiast ceramiczną pianę wyprodukowaną z czerwonego szlamu (produkt uboczny powstały w trakcie produkcji aluminium w procesie Bayera) oraz popiołu lotnego (powstałego w elektrociepłowni) z dodatkiem boranu sodu i krzemianu sodu. Otrzymana piana charakteryzowała się porowatością rzędu 64,14-74,15% oraz wytrzymałością na ściskanie 4,04-10,63 MPa. W przypadku zginania wytrzymałość spadała do poziomu 2,31–8,52 MPa. Widać tu, podobnie jak w przypadku piany szklanej (Tabela 1.4), duże dysproporcje w wytrzymałości w zależności sposobu obciążenia próbki. Gęstość względna uzyskanej piany wynosiła 0,51–0,64 g cm⁻³, a nasiąkliwość wodna była na poziome $\sim 2.31-6.02\%$. Z tego powodu pianki te uznano za dobre materiały m.in. do izolacji termicznej i akustycznej. W artykule [19] podjęto temat spienionego szkła wytworzonego ze szkła sodowo-wapiennego pochodzącego z odpadów po szybach okiennych. Badana struktura zbudowana była z komórek otwartych. Autorzy określili maksymalne naprężenia w próbie ściskania w zakresie od ~ 1 do 4 MPa oraz przewodność cieplną w zakresie od 0,048 do 0,079 W (m K)⁻¹. Stwierdzili również, że wzrost gęstości względnej piany skutkuje wzrostem obu parametrów. W trakcie analizy uznano, że przyczyną uszkodzenia struktury może być kruche pękanie cienkiego brzegu. Inni badacze badali mechanizm uszkodzeń w piankach syntaktycznych metodami eksperymentalnymi [20,21,22]. Piany syntaktyczne sa materiałami kompozytowymi, które powstają w wyniku wypełnienia przestrzeni wewnątrz metalu, ceramiki lub polimeru pustymi mikro balonikami lub drobinami perlitu. Wśród opublikowanych prac brakuje takich, w których wyniki eksperymentalne zostałyby poparte rozważaniami teoretycznymi.

Ciekawym, praktycznym przykładem zagadnień związanych z wytrzymałością materiałów piankowych była awaria zbiornika do przechowywania asfaltu, zlokalizowanego na terenie zakładu petrochemicznego. Rysunek 1.8 prezentuje lokalizacje zbiornika na terenie petrochemii, a rys. 1.9 przedstawia sam zbiornik, który uległ awarii w 2014 roku. Był on osadzony na płycie fundamentowej z izolacją wykonaną ze spienionego szkła (FOAMGLAS®) wyprodukowanego przez firmę Pittsburgh Corning.



Rys. 1.8. Lokalizacja uszkodzonego zbiornika [źródło google maps]



Rys. 1.9. Zbiornik przeznaczony do przechowywania przetworów z ropy na terenie zakładów petrochemicznych

Jak już wspomniano zbiornik służył do przechowywania asfaltu powstałego w trakcie procesu rafinacji ropy naftowej. Narażony był on na pracę w wysokiej temperaturze dochodzącej do 300°C. Po stosunkowo krótkim czasie eksploatacji stwierdzono pęknięcie i zapadnięcie blachy dna zbiornika, który osadzony był na izolacji termicznej wykonanej ze spienionego szkła. Przyczyną zapadnięcia się dna zbiornika było uszkodzenie warstwy spienionego szkła, do którego doszło w wyniku obciążenia ściskającego od ciężaru płynnego asfaltu i sił ścinających, które powstały w wyniku zmiany gabarytów zbiornika spowodowanych zmianami jego temperatury.

2. Cel i zakres pracy

Niniejsza praca dotyczy określenia wytrzymałości i zbadania mechanizmu zniszczenia spienionego szkła pod wpływem obciążeń mechanicznych i termicznych.

W przypadku materiałów porowatych, takich jak spienione szkło, z reguły zakładano, że przenoszenie obciążeń przez konstrukcję zapewniać będą inne, specjalnie do tego zaprojektowane elementy struktury, a wypełnienie będzie miało znaczenie jedynie ustateczniające lub izolacyjne (akustyczne i termiczne). Dlatego w literaturze znajduje się wiele publikacji dotyczących optymalizacji procesu produkcji, wpływu dodatków i innych parametrów procesu wytwarzania na strukturę materiału, a jedynie nieliczne badania dotyczyły wytrzymałości wypełnienia. Okazuje się, że w pewnych warunkach obciążenia zmiennego w czasie i szoków cieplnych praca konstrukcji zależy od wytrzymałości porowatego wypełnienia i jego odporności na zniszczenie. Stąd, celem pracy było zbadanie wpływu budowy struktury porowatej na jej właściwości wytrzymałościowe, a w szczególności:

- określenie miejsca inicjacji zniszczenia,
- znalezienie sposobu wprowadzenia obciążenia w strukturę tak, aby zwiększyć jej nośność,
- określenie ciśnienia wewnętrznego wewnątrz struktury porowatej i wskazanie jego wpływu na nośność,
- ustalenie wpływu obciążeń cieplnych na wytrzymałość.

Założony cel pracy oraz analiza stanu wiedzy prezentowana w dostępnej literaturze pozwala na sformułowanie następującej tezy:

Modelowanie struktury porowatej za pomocą metody elementów skończonych, wsparte badaniami doświadczalnymi, pozwala na określenie lokalizacji inicjacji zniszczenia i sformułowanie wytycznych odnośnie sposobu wprowadzania obciążeń w strukturę posiadającą wypełnienie w postaci szkła spienionego oraz umożliwia zbadanie wpływu ciśnienia w komórkach wypełniacza na wytrzymałość struktury.

Praca obejmować będzie zagadnienia modelowania mikrostruktury materiału porowatego, analizy MES stanu naprężeń i przemieszczeń wewnątrz takiej struktury oraz badania eksperymentalne jej właściwości wytrzymałościowych z wykorzystaniem metody cyfrowej korelacji obrazu (DIC – Digital Image Correlation). W pracy zostanie uwzględniony wpływ czynników technologicznych (ciśnienie wewnątrzkomórkowe) oraz sposobu wprowadzania obciążeń mechanicznych w strukturę pianki szklanej na wytrzymałość i przebieg procesu destrukcji materiału. W celu przeprowadzenia symulacji numerycznych MES zbudowany zostanie model materiału o zamkniętych komórkach, który po zweryfikowaniu go na drodze eksperymentu posłuży do wyznaczenia obwiedni stanów granicznych spienionego szkła w złożonych stanach naprężenia. W wyniku prowadzonych symulacji i badań doświadczalnych sformułowane zostaną wnioski dotyczące sposobów poprawy właściwości wytrzymałościowych szkła spienionego w warunkach obciążeń mechanicznych i termicznych poprzez odpowiednie zalecenia dotyczące technologii jego wytwarzania, wytycznych projektowych odnośnie metod łączenia z podłożem, oraz sposobów obciążania, które uwzględniają asymetrię właściwości wytrzymałościowych.

3. Wytrzymałość materiałów komórkowych

W rozdziale omówiona zostanie klasyfikacja materiałów piankowych, ich najważniejsze właściwości oraz obszary, w których znalazły zastosowanie. Na koniec omówione zostaną hipotezy wytrzymałościowe potrzebne do zrozumienia procesu niszczenia struktury piankowej.

W przypadku ogólnie pojętych materiałów piankowych mogą występować różnego rodzaju zjawiska takie jak: kruche pękanie, uplastycznianie, nośność graniczna, przystosowanie zmęczeniowe, duże deformacje i związane z nimi zjawiska kontaktowe pomiędzy komórkami, hiperelastyczność oraz zagadnienia stateczności ustroju. Głównym obszarem zainteresowania tej pracy są piany szklane. Szkło jest materiałem sprężysto-kruchym, dlatego rozważania ograniczone zostaną do zagadnienia nośności sprężystej mikrostruktury, po przekroczeniu której dochodzi do przerwania ciągłości materiału.

3.1. Definicja oraz klasyfikacja materiałów komórkowych

Przedmiotem podjętej analizy są spienione materiały (o strukturze komórkowej). Zgodnie z definicją z encyklopedii PWN pianą nazywamy układ dyspersyjny utworzony z pęcherzyków gazu stanowiącego fazę rozproszoną w ośrodku dyspersyjnym [23]. Ośrodkiem rozpraszającym może być zarówno ciecz jak i ciało stałe. Inaczej pianę można zdefiniować jako mieszaninę materiałów o różnych fazach, z których jedna jest gazem. Natomiast John Banhart w swojej pracy [24] zaproponował podział przedstawiony na rys. 3.1. Podział ten grupuje materiały ze



Rys. 3.1. Podział materiałów ze względu na rozproszenie względem faz [24]

względu na rozproszenie materiału w zależności od stanu skupienia (fazy). Stosując zaproponowany przez niego podział, pianą nazywać można jedynie gaz rozproszony w płynie. Natomiast jeśli gaz rozproszony zostanie w ciele stałym, struktura taka nazywana będzie ciałem porowatym. Niemniej jednak na potrzeby niniejszej pracy pojęcie piany będzie stosowane zamiennie i uznawane za tożsame z ciałem porowatym.

Ze względu na pochodzenie, piany możemy podzielić na: naturalne oraz syntetyczne (rys. 3.2). Przykładem struktury porowatej występującej w naturze może być kora dębu korkowego, pumeks lub koral. Innym przykładem struktury porowatej, występującej w naturze, przenoszącej obciążenia mechaniczne, jest tkanka kostna. Do tworów syntetycznych zaliczają się spienione metale lub pianki poliuretanowe. Drugim możliwym kryterium podziału materiałów komórkowych jest budowa struktury (rys. 3.3). Wyróżnić można tu struktury płaskie oraz przestrzenne. Struktury przestrzenne mogą występować zarówno w postaci piany z komórkami zamkniętymi jak i otwartymi. O strukturze mówimy, że składa się ona z komórek zamkniętych, kiedy nie jest ona nasiąkliwa (struktura nie nabiera wody w wyniku jej zanurzenia). Oznacza to, że gaz w jej wnętrzu nie może zostać wyparty. Znacząco poprawia to właściwości izolacyjne (termiczne oraz akustyczne). Przykładem struktury płaskiej może być



Rys. 3.2. Podział pianek ze względu na pochodzenie



Rys. 3.3. Podział pianek ze względu na rodzaj struktury

plaster miodu pszczelego jako twór naturalny lub syntetyczny aramidowy wypełniacz komórkowy do struktur lotniczych (rys. 3.4). Wapienny szkielet ochronny gąbki może być przykładem struktury otwartej występującej w naturze (rys. 3.5a). Rysunek 3.5b przedstawia spieniony poliuretan o zamkniętych komórkach.



(a)

Rys. 3.4. Płaska struktura komórkowa: a) plaster miodu [25], b) aramidowy wypełniacz komórkowy [26]



Rys. 3.5. Struktura komórkowa: a) komórki otwarte – szkielet gąbki, b) komórki zamknięte – spieniony poliuretan [27]

3.2. Wytwarzanie materiałów komórkowych

Spienieniu można poddać praktycznie każdy materiał. W powszechnym użyciu widzimy spienione polimery, jednak materiały takie jak szkło, ceramika czy metale też mogą zostać poddane procesowi spieniania. Proces ten polega na wytworzeniu wewnątrz litego materiału porów wypełnionych gazem. Dzięki temu zabiegowi redukcji ulega gęstość względna gotowego produktu. Istnieje wiele metod spieniania materiałów. W przypadku spienionego szkła najczęściej spotykaną metodą jest spiekanie mieszaniny granulatu szklanego pochodzącego z recyclingu i czynnika spieniającego. Rysunek 3.6 przedstawia proces wytwarzania spienionego szkła wykorzystywany przez firmę Pittsburgh Corning.



Rys. 3.6. Schemat wytwarzania spienionego szkła [28]

W pierwszym etapie procesu odpady szklane pozyskane z recyklingu mieszane są razem z piaskiem, węglanem sodu, skaleniami (grupa minerałów skałotwórczych), siarczanem sodu, azotanem sodu oraz tlenkiem żelaza. Mielone są one razem na bardzo drobny granulat (1). Uzyskany produkt przetapiany jest w temperaturze 1250°C (2). Roztopiony materiał kształtuje

się w cienkościenną rurkę (3). Umożliwia to potem dokładne zmielenie materiału do postaci drobnego pyłu (5). W trakcie procesu mielenia dodaje się czynnik spieniający oraz dodatki ułatwiające możliwość spieniania szkła (6). Gotowa mieszanka trafia do form oraz jest podgrzewana do temperatury około 850°C (8). Po przekroczeniu temperatury zeszklenia topiące się szkło otacza, zamykając w swojej masie, czynnik spieniający. W tych warunkach następuje gazyfikacja czynnika spieniającego. W przypadku zachowania równomiernego wzrostu ciśnienia oraz odpowiedniego stopnia rozproszenia, otrzymana struktura spełnia cechy ciała izotropowego. Stopień dyspersji sterowany jest poprzez czas oraz prędkość nagrzewania. Cały proces ma predefiniowany czas, po upłynięciu którego następuje redukcja temperatury. W tym momencie znacząco wzrasta lepkość stopionego szkła. Dzięki temu możliwe jest utrzymanie i zachowanie wytworzonej struktury. Jednym z kluczowych elementów procesu jest maksymalne, równomierne rozproszenie fazy gazowej. Pozwala to na uzyskanie struktury o zamkniętych porach i komórkach o zbliżonym kształcie, co przekłada się na lepsze właciwości mechaniczne wytworzonego materiału. Istotnym elementem procesu jest dopilnowanie, by gazyfikacja czynnika spieniającego nastąpiła po przekroczeniu punktu mięknięcia szkła. Masa szklana musi być plastyczna. Wzrost ciśnienia wewnątrz struktury powoduje rozrost pęcherzy gazu. Dzięki temu możliwe jest sterowanie gęstością finalnego produktu, wielkością porów oraz grubością ścianek struktury. Dwoma najważniejszymi czynnikami procesu utrwalania struktury są: napięcie powierzchniowe szkła oraz jego lepkość. W trakcie wytwarzania piany celem jest minimalizacja napięcia powierzchniowego i maksymalizacja lepkości. Na obie właściwości wpływ ma temperatura masy. Redukcja napięcia powierzchniowego umożliwia łatwiejsze rozrastanie się pęcherzy z gazem. Spada ono wraz z przyrostem temperatury. By ułatwić ten proces dodatkowo dodaje się substancje obniżające napięcie powierzchniowe. Bardzo ważne i dość skomplikowane jest dobranie odpowiedniej charakterystyki grzania i ochładzania. Wymaga to przeprowadzenia wielu prób i testów w celu uzyskania pożądanego efektu końcowego. Po wytworzeniu spienionych bloków, są one wyżarzane w celu redukcji naprężeń wewnętrznych (10). Następnie spienione szkło przycinane jest do prostopadłościennych boków (11) oraz pakowane (12). Rysunek 3.7 prezentuje zdjęcie powierzchni spienionego szkła.

Dla spienionych metali najbardziej popularną metodą produkcji jest spienianie poprzez nadmuchiwanie gazu do roztopionego materiału bazowego. Wymagana ona domieszkowania metalu z cząstkami Al₂O₃ lub MgO. Powodują one zwiększenie lepkości mieszaniny do poziomu wymaganego przez proces spieniania.



Rys. 3.7. Powierzchnia spienionego szkła

Proces spieniania wykonywany jest poprzez samo przedmuchiwanie roztopionego metalu gazem, ponieważ bardzo szybko dochodzi do utrwalenia ścianek komórek. Gaz wprowadzany jest do metalu przez wirującą dyszę (rys. 3.8), która zapewnia odpowiednią dyspersję. Do procesu wytwarzania wykorzystuje się argon, azot lub powietrze. Dodatkowo do mieszaniny mogą zostać dodane cząstki ceramiczne. Powodują one stabilizację piany. Spieniona część roztopionego materiału wypływa na powierzchnię, gdzie ulega studzeniu, i przy pomocy podajnika taśmowego podawana jest dalej w celu utwardzenia struktury. Metoda ta pozwala produkować pianę metaliczną w sposób ciągły. Do jej wad należy jednak mała kontrola procesu powstawania porów. Mogą one mieć różne kształty oraz rozmiary. Powoduje to na przykład lokalne wzrosty lub spadki gęstości gotowego wytworu. Przykład spienionego aluminium pokazano na rys. 3.9. Gotowy produkt ma specyficzną strukturę – na zewnątrz tworzy się szczelna warstwa, którą porównać można do skórki od chleba. Wewnątrz widzimy porowatą strukturę, która może składać się zarówno z komórek otwartych jak i zamkniętych.



Rys. 3.8. Schemat wytwarzania pianki aluminiowej metoda nadmuchiwania [29]



Rys. 3.9. Przykład wytworzonej pianki aluminiowej [29]

Istnieją również inne metody wytwarzania spienionych materiałów. W pracy [30] opisano właściwości pianek siluminowych otrzymywanych w procesie przypominającym wypiekanie ciasta. W tym procesie mieszanina opiłków aluminiowych (Al) oraz tlenku tytanu (TiO₂) umieszczana jest w formie i podgrzewana. W trakcie procesu wygrzewania następuje przetopienie przygotowanych opiłków oraz wzrost otrzymanej masy, podobny do wzrostu ciasta, które pobudzane jest przez drożdże piekarskie lub proszek do pieczenia. Podobnie jak w przypadku wypieku, otrzymany produkt posiada zewnętrzną "skórkę".

3.3. Właściwości materiałów komórkowych

Stopień spieniania materiałów pozwala na modyfikowanie ich struktury, a to powoduje znaczące rozszerzenie zakresu dostępnych właściwości materiałowych, co pokazano na rys. 3.10 [27]. Przedstawione jest porównanie wybranych właściwości (gęstości, przewodności cieplnej, modułu Younga oraz wytrzymałości na ściskanie) materiałów pełnych oraz spienionych. Na jego podstawie można stwierdzić, że spieniając materiał poprawie ulega izolacyjność termiczna – co wynika ze spadku przewodności cieplnej. Podobny efekt uzyskuje się w przypadku izolacji akustycznej. Dodatkowo poprzez wprowadzenie porów spada gęstość materiału.



Rys.3.10. Zakresy właściwości materiałowych dostępnych dzięki spienianiu: a) gęstość, b) przewodność cieplna, c) moduł Younga, d) wytrzymałość na ściskanie [27]

Zdefiniujemy teraz szereg właściwości opisujących materiały porowate:

Porowatość jest wielkością wyrażającą wielkość/ilość porów (pustych przestrzeni) wewnątrz materiału. Wielkość ta to stosunek objętości porów do całkowitej objętości próbki. Wydzielić tu można trzy rodzaje tej wielkości:

- porowatość otwarta (P_o),
- porowatość zamknięta (P_z),
- porowatość całkowita (P_c).

Porowatość otwarta określa stosunek objętości porów otwartych do całkowitej objętości.

$$P_o = \frac{V_{po}}{V} \cdot 100\% \tag{3.1}$$

gdzie: V_{po} – objętość porów otwartych, V – całkowita objętość.

Porowatość całkowita wyraża stosunek objętości wszystkich porów (otwartych i zamkniętych) do objętości całego materiału

$$P_c = \frac{(V_{po} + V_{pz})}{V} \cdot 100\%$$
(3.2)

gdzie V_{pz} to objętość porów zamkniętych.

Porowatość zamknięta może być zdefiniowana jako

$$P_z = \frac{V_{pz}}{V} \cdot 100\% \tag{3.3}$$

lub

$$P_z = P_c - P_{po} \tag{3.4}$$

Ciężar objętościowy określa gęstość spienionego materiału. Piana składa się z dwóch faz: stałej oraz gazowej. Z tego powodu poza ciężarem litego materiału definiuje się również ciężar piany – wyraża on stosunek masy piany do całkowitej objętości piany (uwzględniając obie fazy)

$$\rho_o = \frac{m}{V_c} \tag{3.5}$$

gdzie: m – masa piany, V_c – objętość całkowita.

Nasiąkliwość mówi o poziomie zamknięcia komórek wewnątrz struktury i określa zdolność do wchłaniania wody przez pianę. W przypadku struktury o zamkniętych wszystkich komórkach wielkość ta wynosi zero. Wyznaczenie tej wielkości odbywa się poprzez pomiar suchej próbki piany oraz pozostawionej do nasiąknięcia na 24 godziny. Nasiąkliwość wyznacza się ze wzoru:

$$\eta = \frac{m_n - m_s}{m_n} \cdot 100\% \tag{3.6}$$

gdzie: m_n – masa próbki po nasączeniu, m_s – masa suchej próbki.

Wytrzymałość na ściskanie (\mathbf{R}_c) określa maksymalne naprężenie, które jest w stanie przenieść struktura. Do jego wyznaczenia próbki poddaje się testom ściskania na maszynach wytrzymałościowych. Obciążenie powinno być zwiększane z niewielką prędkością, by nie powodować efektów dynamicznych. Wyraża się je jako:

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{3.7}$$

gdzie: F – maksymalna siła, A – powierzchnia działania siły.

W przypadku złożonych materiałów znacznie rzadziej wykonuje się próby rozciągania. Wynika to w głównej mierze z trudności związanych z prawidłowym uchwyceniem próbki, które nie wpłynęłoby na wynik próby. Jeśli z jakiś względów wymagane jest sprawdzenie wytrzymałości na rozciąganie dla materiałów kruchych (takich jak szkło) powszechnie stosuje się próbę zginania. Pozwala ona na wyznaczenie maksymalnych naprężeń w próbce. Ze względu na asymetrię właściwości wytrzymałościowych tą limitującą wielkością jest wytrzymałość na rozciąganie. Podczas zginania występują dwa stany o identycznym poziomie naprężenia, ale o przeciwnych znakach (rozciąganie i ściskanie). Destrukcja materiałów kruchych zaczyna się po stronie rozciąganej.

Zdefiniujmy teraz wielkości względne określające właściwości spienionych materiałów bezpośrednio względem materiałów rodzimych:

Gęstość względna wyrażana jest jako stosunek gęstości piany do gęstości materiału macierzystego

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_o}{\rho_s} \tag{3.8}$$

Względny moduł Younga jest to stosunek modułu Younga piany do modułu Younga materiału macierzystego

$$\bar{E} = \frac{E_o}{E_s} \tag{3.9}$$

W podobny sposób można zdefiniować wszelkiego rodzaju właściwości względne. Należałoby również wprowadzić pewnego rodzaju miary porównawcze dające możliwość porównywania ze sobą różnych materiałów. Na podstawie rys. 3.10 można stwierdzić, że redukując gęstość zmniejszeniu ulega również wytrzymałość materiału. Można też określić jaka będzie finalna masa części przy zachowaniu takiej samej nośności.

3.4. Zastosowanie materiałów komórkowych

Właściwości materiałów porowatych przedstawione w rozdziale 3.3 determinują główne obszary ich zastosowania: termiczna i akustyczna izolacja, wypełniacze, wyporność oraz materiał konstrukcyjny. Godna uwagi jest też zdolność do pochłaniania energii – elementy zderzaków lub absorberów energii zderzeń (główny udział mają tu materiały plastyczne,

w których energia zderzenia spożytkowana zostaje na odkształcenie plastyczne). Daje to szeroką gamę możliwości ich zastosowania: zabezpieczenia przesyłek, produkcja mebli, przemysł samochodowy (siedzenia, zderzaki), przemysł jachtowy (elementy wypornościowe, kamizelki ratunkowe), przemysł lotniczy (pokrycia przekładkowe kompozytowo-piankowe typu sandwich).

Materiały piankowe stosowane są jako izolatory cieplne ze względu na niską przewodność cieplną. W głównej mierze chodzi tu o pianki elastyczne wykonane z poliuretanów (PU). Powszechnie występują one w otaczającym nas świecie, począwszy od pianek do nurkowania, kubków na ciepłe napoje, po elementy izolacyjne w petrochemiach, zbiornikach z ciekłym gazem czy statkach kosmicznych (wymagana jest odporność na duże gradienty temperatur – zmiany od ekstremalnie niskich do ekstremalnie wysokich). W przypadku zagrożenia pożarem doskonałym materiałem izolacyjnym jest spienione szkło ze względu na odporność na wysoką temperaturę, niepalność i przyzwoite właściwości mechaniczne.

Pianki są bardzo dobrymi pochłaniaczami energii ze względu na złożoną strukturę wewnętrzną, podczas uderzenia destrukcji ulegają kolejne komórki struktury. Zniszczenie pojedynczej komórki skutkuje pochłonięciem energii. Dlatego pianki poliuretanowe stosowane są jako wypełniacze w przesyłkach pocztowych. Niewielka ich masa nie wypływa znacząco na finalną masę paczki, a jej zastosowanie pozwala na zabezpieczenie cennej zawartości. W przypadku spienionych metali są one coraz powszechniej stosowane jako wypełniacze w konstrukcjach samochodów. Zwiększają one sztywność cienkościennych profili składających się na konstrukcje samochodu, nie zmieniając w sposób diametralny ich masy. Dodatkowo w przypadku zderzenia taki profil pochłonie znacznie więcej energii niż pełny lub cienkościenny bez wypełnienia. Dodatkowym atutem w przypadku pianek metalicznych są dodatkowe właściwości mechaniczne typowe dla metali. Chodzi tu o plastyczność. Praca sił zewnętrznych spożytkowana zostaje na plastyczne płynięcie materiału, co pozwala na absorbcję znaczących ilości energii.

Jak opisano w rozdziale 3.3, cechą materiałów porowatych jest ich zwilżalność. Jeśli weźmie się pod uwagę piankę o zwilżalności równej 0 oraz znacznie mniejszej gęstości (mniejsza niż gęstość wody) w porównaniu do materiału pełnego, to zyskujemy doskonały materiał do konstruowania łodzi (wypełnienie komór wypornościowych).

Naturalne materiały porowate są wykorzystywane w elementach konstrukcyjnych od zarania dziejów. Jednym z najbardziej popularnych materiałów stosowanych w budownictwie

jest drewno. Stosowane jest ono jako materiał konstrukcyjny oraz, ze względu na swoje właściwości izolacyjne i walory estetyczne, jako materiał wykańczający. Główną wadą drewna jako materiału konstrukcyjnego jest jego mała odporność biologiczna – konieczne jest odpowiednie zabezpieczanie jego powierzchni. Innym przykładem wykształcenia przez naturę struktur komórkowych są części korowe kości (ssaków, gadów, ptaków oraz płazów) i szkielety koralowców.

3.5. Wpływ niedoskonałości struktury na właściwości materiałów porowatych

Patrząc makroskopowo na strukturę spienionych materiałów wydawać się może, że są to materiały jednorodne o uporządkowanej strukturze i identycznych komórkach. Przyglądając się im dokładniej, np. przy użyciu mikroskopu, można zauważyć, że są to twory odległe od idealnie periodycznie powtarzalnej struktury. Można zdefiniować szereg następujących niedosko-nałości struktury piany:

- niejednorodny kształt komórki,
- niejednorodny rozmiar komórki,
- zmienna grubość ścianek,
- pofalowanie ścianek komórki.

Niedoskonałości sieci komórkowej wynikać mogą z wielu czynników: nierównomierności we właściwościach materiału bazowego, braku stabilności paramentów takich jak temperatura w trakcie tworzenia spienionego materiału oraz wielu innych. W pracy [31] badano wpływ rozmiarów porów na spadek ciśnienia przepływającego płynu przez otwartą strukturę spienionego szła. Grenestedt w swojej pracy [32] badał wpływ pofalowania struktury na globalną jej sztywność. Przedstawił tam rozwiązanie dla struktur o otwartych komórkach przy pomocy metod analitycznych (przy założeniu modelu belkowego). Wyznaczył wpływ rozmiaru fali na moduł Younga oraz moduł Kirchhoffa. Rysunek 3.11 przedstawia otrzymaną przez niego zależność stosunku względnego modułu Younga dla materiału piany $\left(\frac{\bar{E}}{E}\right)$ do względnej gęstości $\left(\frac{\bar{p}}{\rho}\right)$ w funkcji znormalizowanego pofalowania ścianki $\left(\frac{w_0}{t}\right)$, wyrażonego jako stosunek odchylenia geometrii ścianki do jej wymiaru poprzecznego *t* (przy założeniu kwadratowego przekroju poprzecznego). Z wykresu tego widać, że wraz ze wzrostem pofalowania znacząco spada sztywność struktury.

Simone i Gibson [33] badali wpływ pofalowania ścianek na ich wytrzymałość i sztywność pianek metalicznych o zamkniętych komórkach. W swoich rozważaniach badali oni sześciokątne komórki plastra miodu z zastosowaniem metody elementów skończonych. Rysunek 3.12 przedstawia uzyskane przez autorów wyniki. Autorzy w celu opisania krzywizny ścianek zdefiniowali parametr l/2R, gdzie l oznacza długość ścianki, a R promień jej krzywizny. Dla sześciokątnych komórek o prostych ściankach parametr l/2R wynosi zero. Widać, że w przypadku struktur o zamkniętych ściankach wpływ pofalowania na sztywność jest znacznie mniejszy w porównaniu do struktur o komórkach otwartych.



Rys. 3.11. Zależność znormalizowanego modułu Younga w funkcji znormalizowanej wielkości fali [32]



Rys. 3.12. Wpływ pofalowania ścianek struktury o zamkniętej strukturze na jej sztywność oraz wytrzymałość [33]

Grenested i Bassinet w swojej pracy [34] badali wpływ wariancji grubości ścianek na zachowanie się struktury. Rozważali oni pianki o komórkach zamkniętych przy pomocy metody elementów skończonych. Rysunek 3.13 przedstawia wyznaczoną przez nich zależność.


Rys. 3.13. Wpływ wariancji grubości ścianki na moduł Kirchhoffa [34]

Przedstawiono na nim znormalizowane wyniki zależności amplitudy wariancji grubości ścianki α na moduł Kirchhoffa. W zdefiniowanym przez nich modelu grubość ścianki o numerze *i* wynosiła: $t_i = t_0(1 + \alpha \cdot \varphi_i)c$. W tym wzorze α mogła przyjmować wartość w zakresie od 0 do 1. φ_i jest zmienną stochastyczną w zakresie od –1 do 1. Jeśli α przyjmuje wartość równą 0 mamy do czynienia ze strukturą idealną, w której wszystkie ścianki posiadają tę samą grubość. We wzorze współczynnik c został wprowadzony w celu normalizacji, aby utrzymać stałą gęstość piany. *G*(0) to moduł Kirchhoffa dla struktury idealnej, *G*(α) natomiast odpowiada strukturze o zaburzeniu struktury wynoszącym α .

Niejednorodność kształtu komórek elementarnych rozważana była przez Van der Burga w pracy [35] oraz przez Grenestedta i Tanaka w pracy [36]. W pierwszej pracy analizie podano struktury o komórkach otwartych. Autorzy wykorzystali teseleację Woronoja. W przypadku przestrzeni dwuwymiarowej polega ona na jej podziale na *n* podobszarów dla n punktów w taki sposób, że każdy punkt w dowolnym obszarze znajduje się bliżej określonego punktu ze zbioru n punktów, niż od pozostałych *n*-1 punktów. Druga praca podnosi temat struktur o komórkach zamkniętych. Obie prace zwracają uwagę na fakt, że wzrost niejednorodności budowy struktury przekłada się na znaczący wzrost wpływu efektów zgięciowych, co powoduje nieliniowy spadek właściwości. Silva i Gibson ([37]) zbadali natomiast wpływ usuwania ścianek na zachowanie się struktur dwuwymiarowych. Ich badania wskazują, że struktury z niejedno-rodnymi podziałami (struktura typu Woronoja) są średnio o 30–35% słabsze w porównaniu do idealnej struktury plastra miodu o tej samej gęstości. Usuwanie ścianek struktury powoduje dramatyczny spadek jej wytrzymałości. Zmniejszenie gęstości względnej struktury o 10% poprzez usunięcie części ścianek przekłada się na 60% spadek wytrzymałości struktury typu Woronoja.

3.6. Hipotezy wytrzymałościowe

Dla typowych materiałów konstrukcyjnych wraz ze wzrostem obciążenia, w pewnym momencie dochodzi do zjawiska płynięcia materiału. Towarzyszy temu poślizg warstw sieci krystalicznej i dochodzi do odkształcenia plastycznego. Ze względu na fakt, że trwałe deformacje nie są pożądane w tracie użytkowania jakiegoś urządzenia, zdefiniowano kryteria wytrzymałościowe, których zadaniem jest ograniczenie dozwolonych obciążeń dla danej konstrukcji tak, by nie pojawiły zjawiska związane z plastycznym odkształceniem materiału. Dla materiałów plastycznych najczęściej stosowanymi hipotezami wytrzymałościowymi są:

- hipoteza Hubera-Misesa, zwana hipotezą energii odkształcenia postaciowego,
- hipoteza Coulomba-Treski, zwana hipotezą maksymalnych naprężeń stycznych.
 W przypadku materiałów kruchych zastosowanie znajdują hipotezy:
- Mohra-Coulomba, zwana hipotezą maksymalnych naprężeń stycznych,
- Galileusza-Rankine'a, zwana hipotezą maksymalnego naprężenia rozciągającego i ściskającego.

W materiałach kruchych zauważana jest dysproporcja w wytrzymałości na rozciąganie (R_r) oraz ściskanie $(R_c - brana jako wartość bezwzględna)$. Można tu zdefiniować wielkość zwaną kruchością (*K*). Wyraża ona stosunek wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie (3.10). Materiał uznaje się za kruchy, gdy jego kruchość jest mniejsza od 1/8

$$K = \frac{R_r}{R_c} < \frac{1}{8} \tag{3.10}$$

Przykładem materiału kruchego może być żeliwo szare, beton oraz szkło. Hipoteza Mohra-Coulomba jest rozwinięciem hipotezy Coulomba-Treski; uwzględnia ona asymetrię w wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie. Według hipotezy Mohra naprężenia pośrednie (σ_2) nie wpływają na mechanizm zniszczenia materiału. Natomiast istotne znaczenie mają stany graniczne. Z tego względu należy zwrócić szczególną uwagę na naprężenia w kierunkach głównych σ_1 oraz σ_3 . Najłatwiej wyjaśnić to na przykładzie. Rysunek 3.14 prezentuje kostkę elementarną obciążaną trójwymiarowym stanem rozciągania. Dla tej kostki można wykreślić koła Mohra, a bazując na nich można pokazać, że naprężeniu normalnemu σ_* odpowiadają punkty leżące na prostej ABC, różniące się między sobą naprężeniami tnącymi. Intuicyjnie można dojść do wniosku, że najbardziej niebezpiecznymi stanami z tych wszystkich punktów są punkty A oraz C. Zatem o zniszczeniu będzie decydowało zewnętrzne koło Mohra

danego materiału, można wyznaczyć krytyczne koła Mohra dla różnych stanów obciążenia. Rysunek 3.15 prezentuje przykład takiej obwiedni.



Rys. 3.14. Stan naprężenia na kostce elementarnej

Koło wyznaczone przez punkty OA odpowiada stanowi czystego rozciągania. CO natomiast odpowiada czystemu ściskaniu. Stan czystego ścinania reprezentowany jest przez koło wyznaczone przez punkty DB. Punkt M odpowiada stanowi trójosiowego rozciągania. Ze względu na ograniczenia techniczne i finansowe próby wytrzymałościowe ogranicza się do stanu jednoosiowego ściskania i rozciągania. Na ich podstawie krzywe zaprezentowane na rys. 3.15 uprasza się do linii stycznych do dwóch kół Mohra zdeterminowanych w trakcie prób wytrzymałościowych – rys. 3.16. Związek pomiędzy σ_1 i σ_3 wyraża równanie:

$$\frac{\sigma_1}{R_r} + \frac{\sigma_3}{R_c} = 1 \tag{3.11}$$

Granica wytrzymałości przy wszechstronnym rozciąganiu wynosi wówczas:

$$R_M = \frac{R_r \cdot R_c}{R_c + R_r} \tag{3.12}$$

Ze względu na anizotropię wytrzymałości materiałów kruchych, w celu określenia czy dany stan jest bezpieczny, posłużyć się można współczynnikiem wykorzystania nośności materiału k według hipotezy Mohra:

$$\frac{\sigma_1}{R_r} + \frac{\sigma_3}{R_c} = 1 \cdot k \tag{3.13}$$

Tak zdefiniowany współczynnik wykorzystania nośności jest odwrotnością współczynnika bezpieczeństwa:

$$n_{\rm Mohr} = \frac{1}{k} \tag{3.14}$$



Rys. 3.15. Obwiednia naprężeń według hipotezy Mohra



Rys. 3.16. Zredukowana obwiednia według hipotezy Mohra

W przypadku hipotezy Galileusza-Rankine'a miarą wytężenia materiału są ekstremalne naprężenia normalne. Oznacza to, że niezależnie od rodzaju obciążenia w danym punkcie stan określamy jako krytyczny, gdy σ_1 lub σ_3 osiągnie wartość graniczą dla danego materiału:

$$\sigma_{\text{limit}} = \max(|\sigma_1|, |\sigma_3|) \tag{3.15}$$

Dla materiału takiego jak szło z dużą dysproporcją między wytrzymałością na ściskanie i rozciąganie sprowadza się to bezpośrednio do warunku, że dany stan jest limitujący jeśli $\sigma_1 = R_r \operatorname{lub} |\sigma_3| = R_c$. Kryterium to po raz pierwszy zostało zdefiniowana jedynie dla naprężeń rozciągających, potem zostało uzupełnione dla naprężeń ściskających. Zatem współczynnik bezpieczeństwa według hipotezy Rankine'a można zdefiniować jako:

$$n_{\text{Rankine}'a} = \min\left(\frac{R_r}{\sigma_1}, \frac{R_c}{\sigma_3}\right)$$
 (3.16)

Norma PN EN 16612:2019 w trakcie projektowania paneli szklanych warunek wytrzymałości ustroju sprowadza do maksymalnego stanu rozciągania przy zganianiu.

4. Modele struktury materiałów porowatych

W rozdziale tym przedstawione zostały modele geometryczne struktur stosowane dla materiałów porowatych. Opisane zostały wymagania, jakie musi spełniać przybliżenie geometryczne struktury. Opisano też zastosowane modele obliczeniowe. W przypadku analiz wytrzymałościowych możliwe są dwa podejścia do tematu modelowania struktury. Można wykorzystać metody analityczne bazujące na rozwiązaniu zagadnienia w oparciu o modele belek i płyt lub też zastosować modelowanie w oparciu o metodę elementów skończonych.

4.1. Model przestrzenny struktury

Podstawowym problemem w przypadku badań poświęconych strukturom ciał komórkowych jest przyjęcie odpowiedniego modelu geometrycznego ich budowy. W tym celu, można by podążać kilkoma ścieżkami, ale tą najbardziej oczywistą jest obserwacja na poziomie molekularnym struktury i zrozumienie procesu jej formowania. Struktura piany zbudowana jest z topologicznie podobnych komórek, dlatego w celu uproszczenia procesu jej modelowania można założyć, że wszystkie komórki będą miały identyczny kształt oraz rozmiar. Wpływ niejednorodności na właściwości struktury został opisany w rozdziale 3.5. Teraz więc należy się zastanowić, jaki kształt będą przybierać owe komórki. Wybrana bryła geometryczna musi spełniać następujące wymagania:

- wypełniać w sposób zupełny przestrzeń,
- minimalizować napięcie powierzchniowe.

Postawione warunki wynikają z procesu formowania się struktury. W trakcie wytwarzania piany o niskiej gęstości dochodzi do gazyfikacji czynnika spieniającego. W wyniku tego powstają odseparowane od siebie pęcherze z gazem. Swobodny pęcherz gazu przyjmuje kształt kuli. Spośród wszystkich brył to właśnie kula posiada maksymalną objętość przy ustalonej powierzchni zewnętrznej. Oznacza to, że minimalizuje energię potrzebną do utrzymania pęcherza (minimalizacja energii napięcia powierzchniowego). Wraz ze wzrostem temperatury, zgodnie z równaniem stanu gazu doskonałego (równanie Clapeyrona (4.1)), dochodzi do wzrostu objętości i ciśnienia wewnątrz pęcherzy i zaniku wolnej przestrzeni między nimi.

$$vV = nRT \tag{4.1}$$

gdzie: p – ciśnienie gazu, V – objętość gazu, n – liczba moli gazu, T – temperatura gazu, R – uniwersalna stała gazowa 8,314 J/(mol·K).

Na pewnym etapie procesu pęcherze zaczynają oddziaływać na siebie powodując deformacje swojego kształtu. Bryłami, które w sposób zupełny wypełniają przestrzeń są bryły platońskie (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Bryły foremne / bryły platońskie: a) czworościan, b) sześcian, c) ośmiościan, d) dwunastościan, e) dwudziestościan

Sześcian lub czworościan są najprostszymi bryłami wypełniającymi przestrzeń w sposób zupełny. Jednakże obserwując otaczający nasz świat ciężko jest wskazać tak zbudowaną strukturę porowatą. Związane jest to z zagadnieniem minimalizacji napięcia powierzchniowego. Poszukiwania odpowiedniej bryły podjął się lord Kelvin już w 1887 roku. Zaproponował on w swojej pracy [38] czternastościan foremny jako bryłę (rys. 4.2), która w sposób zupełny wypełnia przestrzeń, a jednocześnie posiada najmniejszą powierzchnię zewnętrzną w odniesieniu do objętości spośród wszystkich brył spełniających pierwszy wymóg. Czternastościan jest wielościanem o czternastu ścianach zbudowanych z wielokątów foremnych. Czternastościan Kelvina składa się z sześciu ścianek kwadratowych oraz ośmiu ścian sześciobocznych.



Rys. 4.2. Czternastościan foremny/ czternastościan Kelvina

Podobne badania na temat łączących się ze sobą pęcherzy prowadzone są również współcześnie. D. Weaire wraz z R. Phelanem w swojej pracy [39] z 1994 r. zaproponowali swoją strukturę zwaną strukturą Weaire'a-Phelana. Została ona przestawiona na rys. 4.3. Struktura ta składa się z dwóch brył o jednakowej objętości – dwunastościanu (posiadającego dwanaście ścian pięciokątnych) i czternastościanu (składającego się z dwunastu ścian pięciokątnych oraz dwóch sześciokątnych). Dodatkowo poprawkę do tej struktury zaproponował Gabbrielli w pracy [40]. Należy tutaj zauważyć, że struktura zaproponowana przez D. Weaire'a i R. Phelana jest znacznie bardziej złożona geometrycznie, a daje jedynie 0,3% minimalizacji powierzchni zewnętrznej w porównaniu do struktury zaproponowanej przez Kelvina. Dlatego ze względu na podobne wyniki i znacznie łatwiejszą implementację to czternastościan foremny zostanie wykorzystany jako model pojedynczej komórki piany.



Rys. 4.3. Struktura Weaire'a-Phelana [39]

4.2. Model analityczny struktury

Gibson i Ashby w swojej książce [27] przedstawiają uogólnione metody, przy pomocy których można wyznaczyć w przybliżony sposób zastępcze właściwości mechaniczne struktur komórkowych. W rozdziale tym przedstawione zostanie dokładne rozwiązanie dla przyjętej struktury piany. Jak zostało to opisane w rozdziale 4.1 za model geometryczny pojedynczej komórki struktury piany został wybrany czternastościan Kelvina (rys. 4.2). Piany mogą występować w postaci struktury o zamkniętych i otwartych komórkach. Rysunek 4.4a prezentuje model pojedynczej otwartej komórki, rys. 4.4b natomiast przedstawia strukturę zbudowaną w oparciu o taką komórkę. Obserwując dokładniej analizowaną strukturę, poza

komórką przestawioną na rys. 4.4a, można wydzielić inny periodycznie powtarzalny jej fragment. Dokonując cięć w narożnikach można uzyskać element struktury zbudowany w oparciu o prostokątne ramki. Taki element, ukazany na rys. 4.5, posiada wiele zalet. Z jego pomocą, bazując na modelu prętowo-belkowym ramy, można wyznaczyć zastępcze mechaniczne właściwości takiej struktury.



Rys. 4.4. Model belkowy czternastościanu Kelvina



Rys. 4.5. Model ramkowy pojedynczej komórki

Należy tu nadmienić, że właściwości piany są wypadkową zarówno budowy mikroskopowej struktury jak i właściwości materiału bazowego, z jakiego jest ona wykonana. Dla typowych materiałów stosowanych do produkcji piany można przyjąć ich liniowe zachowanie (przy założeniu małego wytężenia materiału lub małych odkształceń). Przy tym założeniu struktura pianki ma również charakterystykę liniową w zakresie obciążeń podkrytycznych, gdy ugięcie jest niewielkie. Dzięki temu makroskopowe właściwości pianki są liniowo sprężyste w pewnym zakresie. W przypadku szkła głównym czynnikiem ograniczającym jego wytrzymałość jest odporność na pękanie (naprężenia rozciągające determinują jego wytrzymałość). Jak już wspominano model zastępczy struktury piany o komórkach otwartych to zestaw prostych prętów pracujących jako belki i tworzących trójwymiarowe ramy. Belki wykonane są z materiału o module Younga *E*, module sprężystości poprzecznej *G*, współczynniku na ścinanie ψ (zależnym od kształtu przekroju). Pole przekroju poprzecznego belki wynosi *A*, moment bezwładności w płaszczyźnie poprzecznej I_y . Wszystkie belki reprezentują lity materiał rozmieszczony wzdłuż krawędzi i mają stałą po długości: sztywność osiową *EA*, sztywność na ścinanie *GA* oraz sztywność na zginanie *EI_y*. Energia odkształcenia zakumulowana w konstrukcji ramy w wyniku odkształcenia z przemieszczeniem osiowym u(x) i przemieszczeniem poprzecznym w(x) odpowiada rozciąganiu, zginaniu i ścinaniu:

$$U = \frac{1}{2} \left[\int_0^l EI_y \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx + \psi \int_0^l GA \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 dx + \int_0^l EA \left(\frac{du}{dx} \right)^2 dx \right]$$
(4.2)

W większości przypadków obciążenie, jakiemu podawane są analizowane struktury (w tym ścinanie), można zastąpić superpozycją ściskania i rozciągania. W przypadku rozciągania może nastąpić szybkie kruche pęknięcie. Z uwagi na to, że rozważane jest liniowe, sprężyste zachowanie się struktury – wyniki będą identyczne zarówno dla rozciągania jak i ściskania. Wysokość komórki, długość i szerokość są równe i zdefiniowane przez wymiar komórki jednostkowej – a. Kwadratowy rozmiar ramki można wyrazić jako:

$$l = a \frac{\sqrt{2}}{4} \tag{4.3}$$

Podczas ściskania obciążeniu poddane są tylko 4 z 6 kwadratowych ramek składowych komórki elementarnej (rys. 4.6). Wszystkie 4 ramki obciążone są w ten sam sposób. Tworzą układ równoległy składający się z dwóch podobnych elementów sprężystych, z których każdy jest układem szeregowym dwóch ramek kwadratowych. Zatem, dokonując uproszczenia, układ ten można sprowadzić do problemu pojedynczej ramki. Kwadratowa rama poddawana jest obciążeniu ukośnemu (w kierunku jej przekątnej), a sztywność komórki elementarnej, będąca miarą modułu Younga, jest równa sztywności pojedynczej ramki dla danego obciążenia. Ze względu na liniowość i symetrię, warto rozłożyć obciążenie na dwa stany: symetryczny i anty-symetryczny, aby wykorzystać zalety zdefiniowanego uproszczonego układu. Dzięki temu zabiegowi łatwo można wyznaczyć przebieg momentu zginającego, siły ścinającej oraz siły osiowej.



Rys. 4.6. Pojedyncza komórka struktury poddana ściskaniu

Sztywność kwadratowej ramki może zostać wyznaczona przez porównanie pracy wykonanej przez zewnętrzne oraz wewnętrzne siły działające na układ. Ostatecznie zależność między modułem Younga piany i materiału bazowego wyraża się tu wzorem [41]:

$$\frac{E_0}{E_s} = \frac{8}{a^2\sqrt{2}} \left[\frac{a^2}{96 I_y} + \frac{1 + 2\psi(1+\nu)}{A} \right]^{-1}$$
(4.4)

Względny moduł Younga czternastościanu foremnego Kelvina zależy oczywiście od parametrów przekroju poprzecznego I_y , A, ψ (stała ścinania) oraz stałej Poissona (v) dla litego materiału. Zakładając kołowy i stały (pryzmatyczny) przekrój belki wzdłuż krawędzi ramki, jako przybliżenie rzeczywistej struktury, można wyznaczyć bezpośrednio zależność względnego modułu Younga od wymiarów geometrycznych takich jak rozmiar komórki *a* oraz średnica przekroju *d*. Ze względu na fakt, że masa komórki również jest zdeterminowana przez wymiary *a* i *d*, względny moduł Younga struktury wyrażony może zostać przez względną masę struktury. Dla czternastościanu foremnego względna gęstość jest funkcją kwadratową stosunku długości krawędzi oraz średnicy przekroju:

$$\bar{\rho} = 0,8333 \left(\frac{d}{l}\right)^2 \tag{4.5}$$

Wyrażenie to jest prawdziwe dla przypadku, gdy długość elementów struktury jest znacznie większa w porównaniu do przekroju poprzecznego i można zaniedbać nakładanie się belek na siebie w zakresie $0 < \bar{\rho} < 0,3$. Podstawiając (4.3) do (4.5) oraz wyrażając moment bezwładności w (4.4) przez gęstość względną uzyskać można względy moduł Younga jako:

$$\frac{E_0}{E_s} = 0.6 \frac{\bar{\rho}^2}{1 + 0.9[1 + 2\psi(1 + \nu)]\bar{\rho}}$$
(4.6)

Zakładając stałą ścinania dla przekroju kołowego równą $\psi = \frac{10}{9}$ otrzymać można:

$$\frac{E_0}{E_s} = 0.6 \frac{\bar{\rho}^2}{1 + (2.9 + 2\nu)\bar{\rho}}$$
(4.7)

Zaniedbując sztywność na ścinanie uzyskujemy wtedy:

$$\frac{E_0}{E_s} = 0.6\bar{\rho}^2 \tag{4.8}$$

Do policzenia stałej Poissona dla struktury można wykorzystać sprężyste właściwości struktury oraz wyniki rozwiązania dla osiowego ściskania. Korzystając z równania (4.5) mamy:

$$\nu_o = 0.5 - \frac{0.9\,\bar{\rho}}{1 + 0.9[1 + 2\psi(1 + \nu)]\bar{\rho}} \tag{4.9}$$

Zakładając ponownie stałą ścinania dla przekroju kołowego równą $\psi = \frac{10}{9}$ otrzymać można:

$$\nu_o = 0.5 - \frac{0.9\,\bar{\rho}}{1 + (2.9 + 2\nu)\bar{\rho}} \tag{4.10}$$

Dla pianek o skrajnie niskich gęstościach, stała Poissona asymptotycznie dąży do 0,5. Oznacza to, że struktura staje się staje się makrosporo nieściśliwa objętościowo i jest to górne oszacowanie stałej Poissona. Biorąc pod uwagę drugi skrajny przypadek, tzn. strukturę pełną ($\bar{\rho} = 1$) wykonaną z materiału o $\nu = 0,3$, mamy stałą Poissona dla pianki równą wartości dla materiału bazowego. Innym podejściem pozwalającym na weryfikację wyznaczonej stałej Poissona jest bezpośrednie odwołanie do definicji tej stałej, licząc poprzeczne odkształcenie pojedynczej komórki piany poddanej jednoosiowemu ściskaniu lub kwadratowej ramki obciążonej wzdłuż jednej z przekątnych. Dodatkowym założeniem upraszczającym jest pominięcie sztywności na ścinanie oraz rozciąganie (cała energia odkształcenia pochodzi od zginania). Wydłużenie przekątnej poprzecznej równe jest skróceniu przekątnej tej ramki wzdłuż której działają siły. Wniosek, że odkształcenie osiowe jest dwa razy większe niż poprzeczne, wynika z tego, że dwie kwadratowe ramy (płaszczyzny prostopadłe) wpływają na przemieszczenie w kierunku siły, podczas gdy tylko jedna wpływa na rozciąganie w kierunku poprzecznym (druga działa w kierunku prostopadłym). Zatem współczynnik Poissona wynosi 0,5.

Analiza ugięcia komórki elementarnej poddanej obciążeniu ścinającemu jest bardziej skomplikowana niż w przypadku rozciągania-ściskania. Dlatego w celu uzyskania modułu ścinania zostanie zastosowana metoda pośrednia. Podobnie jak w obliczeniach stałej Poissona, przyjęto założenie izotropowych właściwości piany. Wtedy moduł sprężystości poprzecznej

pianki jest określony przez moduł Younga i współczynnik Poissona:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{4.11}$$

Wykorzystując równania (4.10), (4.6) oraz (4.9), po przekształceniu i normalizacji do modułu Younga materiału podstawowego (pełnego), otrzymujemy:

$$\frac{G_o}{E_s} = \frac{0.2\bar{\rho}^2}{1 + (2.3 + 2\nu_s)\,\bar{\rho}} \tag{4.12}$$

Założenie modelu czystego zginania (pomijając sztywność na ścinanie i rozciąganie) prowadzi do prostszej formy:

$$\frac{G_o}{E_s} = 0.2\bar{\rho}^2$$
 (4.13)

Przedstawione obliczenia bazują na modelu prętowo-belkowym struktury piany. Dokładny opis i wyprowadzenie przedstawionych równań zaprezentowane są w [41]. Podejście prętowo-belkowe można zastosować do struktur o otwartych komórkach. Prace [42] oraz [43] przedstawiają podejście do modelownia struktur o komórkach otwartych.

W przypadku komórek o zamkniętych ściankach należałoby posłużyć się zastępczym modelem płytowym, co oznacza znaczącą komplikację modelu. Rozwiązanie zagadnienia zginania płyty nie jest już tak trywialne jak zginanie belki. Dlatego w przypadku potrzeby rozwiązania takiego problemu lepiej posłużyć się powszechnie stosowaną metodą elementów skończonych. To podejście zostanie przedstawione w rozdz. 4.3.2. W przypadku komórek o ściankach zamkniętych, stosując te same płaszczyzny w celu uzyskania komórki elementarnej jak na rys. 4.5, uzyskamy bryłę o kształcie przedstawionym na rys. 4.8a. Rysunek 4.8b przedstawia komórkę elementarną zorientowaną w identyczny sposób, pozbawioną jednak ścianek wewnętrznych w celu lepszej wizualizacji.

W przypadku struktur o zamkniętych komórkach można zastosować podobne podejście analityczne, ale konieczne jest uzupełnienie modelu belki o model płyty zginanej. Gibson i Ashby w pracy [27] przedstawiają równanie (4.14) pozwalające wyznaczyć moduł Younga dla pianek o zamkniętych komórkach. W modelu tym masa komórki podzielona jest na regiony belkowe i płytowe.

$$\frac{E_c}{E_s} = C_1 \phi^2(\bar{\rho})^2 + C_1'(1-\phi)\bar{\rho}$$
(4.14)

gdzie: Ø – udział masy zawartej w elementach belkowych, C_1, C'_1 – współczynniki proporcjonalności.

4.3. Model numeryczny struktury

Jeśli będziemy rozważać znacznie większy element struktury piany, rozwiązanie analityczne bazujące na modelach płytowych stanie się znacznie bardziej skomplikowane. Z tego powodu w dalszych rozważaniach struktury piany o zamkniętych komórkach wykorzystana zostanie metoda elementów skończonych (MES).

4.3.1. Podstawowe założenia MES

Metoda elementów skończonych w skrócie MES (ang. finite element method, FEM) jest, powszechnie stosowanym narzędziem w obliczeniach inżynierskich. Ze względu na swoją popularność opis tej metody można znaleźć w wielu różnych źródłach (np. [44,45,46,47]). Głównym obszarem jej stosowania jest mechanika konstrukcji. W tym zastosowaniu jest to metoda przybliżona, która bazuje na twierdzeniu o minimum całkowitej energii potencjalnej układu odkształconego. Pozwala ona na uzyskanie rozwiązania dla obszarów o złożonym kształcie, w przypadku których uzyskanie rozwiązania ścisłego jest trudne lub wręcz niemożliwe. Główną ideą przyświecającą tej metodzie jest podział analizowanego obszaru na mniejsze podobszary zwane elementami skończonymi. Elementy te połączone są ze sobą węzłami. Dzięki wspólnym węzłom zachowana jest ciągłość rozwiązań pomiędzy elementami. Każdy element ma przypisane węzłom funkcje kształtu, które służą do interpolacji poszukiwanej funkcji (np. pola przemieszczeń) wewnątrz elementu. Na ich podstawie zbudowany zostaje funkcjonał, który wyraża całkowitą energię potencjalną układu *V* jako różnicę między energią odkształcenia *U* a pracą wykonaną przez uogólnione siły zewnętrzne. Analizowane zadanie polega na poszukiwaniu minimum tak zdefiniowanego funkcjonału:

$$V = U - W_z = \min \tag{4.15}$$

Argumentem zdefiniowanego funkcjonału opisującego całkowitą energię potencjalną układu jest funkcja opisująca przemieszczenia w analizowanym układzie odkształcalnym. W wyniku działania sił zewnętrznych wewnątrz tego ciała powstaje pole przemieszczeń. Rozwiązaniem zagadnienia jest określenie takiego pola przemieszczeń, które odpowiada najmniejszej energii układu oraz spełnia zadane warunki brzegowe. Całkowitą energię potencjalną układu wyraża równanie:

$$V = U - W_z = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} d\Omega - \int_{\Omega} X_i u_i d\Omega - \int_{\Gamma} p_i u_i d\Gamma$$
(4.16)

gdzie: $\sigma_{ij}\varepsilon_{ij}$ – kolejno tensory stanu naprężenia i odkształcenia, u_i – pole przemieszczeń, p_i – obciążenie brzegowe, X_i – siły objętościowe, Ω – obszar ciała, Γ – brzeg obszaru (rys. 4.7).



Rys. 4.7. Model dyskretny rozpatrywanego układu ciągłego z zaznaczonymi obciążeniami

Ze względu na numeryczną implementację zagadnienia, zdefiniowane związki teorii sprężystości zapisuje się w formie macierzowej. Dla najprostszego przypadku statyki problem może zostać zapisany w formie:

$$[K]{q} = {F} \tag{4.17}$$

gdzie: [K] – globalna macierz sztywności, $\{q\}$ – poszukiwany wektor parametrów węzłowych, $\{F\}$ – globalny wektor zastępczych sił węzłowych.

Rozmiar macierzy sztywności odpowiada liczbie stopni swobody analizowanego układu. Macierz ta powinna być dodatnio określona oraz symetryczna. Po wprowadzeniu do (4.17) warunków brzegowych, macierz sztywności przestaje być osobliwa, co pozwala na otrzymanie jednoznacznego rozwiązania.

4.3.2. Model numeryczny MES

Ze względu na uwarunkowania związane z procesem produkcji pianek, ścianki komórek są relatywnie cienkie, dlatego dla uproszczenia modelu obliczeniowego do jego zbudowania zostały wykorzystane elementy powłokowe.



Rys. 4.8. Model pojedynczej komórki o ścianach zamkniętych: a) model pełny, b) model z usuniętymi ściankami

Model numeryczny MES komórki, zapowiedziany pod koniec rozdziału 4.2, zbudowano w programie Ansys 12.1 . Rysunek 4.8a prezentuje model pojedynczej komórki zbudowanej w oparciu o geometrię czternastościanu Kelvina. Do stworzenia modelu można posłużyć się dwoma rodzajami elementów skończonych: elementami bryłowymi SOLID185 oraz powłokowymi SHELL43 [48]. Elementy powłokowe mogą być stosowane w przypadku, gdy grubość rozważanego elementu jest znacznie mniejsza w porównaniu do jego pozostałych wymiarów (~1/10). W przypadku elementu powłokowego stosuje się jeden element, którego parametrem jest grubość. Pozwala to na ograniczenie liczby elementów. W przypadku zastosowania elementów bryłowych konieczne jest zastosowanie co najmniej trzech elementów skończonych w poprzek grubości ścianki, by w sposób prawidłowy uchwycić zjawisko zginania. Każdy element powłokowy cechuje się sześcioma stopniami swobody w każdym węźle (trzy przemieszczenia oraz trzy obroty), element bryłowy wykorzystuje tylko trzy stopnie swobody w węźle.

Typowa ściana komórki piany cechuje się tym, że jest znacznie cieńsza w środku w porównaniu do części brzegowej. Wynika to z procesu produkcji piany, która powstaje z rozrastających się jej pęcherzy. Wraz z ich wzrostem dochodzi do pocienienia powłoki pęcherza. W przygotowanym modelu założono liniową zmianę grubości komórki piany. Gęstość analizowanego spienionego szkła wynosi 130 kg m⁻³ (tabela 1.4). Bazując na tym oraz na gęstości materiału rodzimego – szkła wapienno-sodowego (2500 kg m⁻³ – tabela 1.2) dobrano grubości ścianek komórki elementarnej. Na potrzeby obliczeń dokonano idealizacji

materiału piankowego. Założono jego izotropowe oraz liniowe właściwości sprężyste, aż do kruchego pękania, które określa dopuszczalne obciążenie materiału. Założono również, że struktura spienionego szkła składa się z okresowo powtarzających się komórek. Rysunek 4.9 prezentuje model MES pojedynczej komórki. Składał się on z 768 elementów SHELL43 i miał 721 węzłów. Różowymi liniami zaznaczono warunki brzegowe modelujące ciągłość struktury. Reprezentują one równania wiążące ze sobą przemieszczenia węzłów leżących na brzegach komórki elementarnej. Model ten może posłużyć do wyznaczenia zastępczego modułu Younga, stałej Poissona lub rozkładu odkształceń i naprężeń wewnątrz struktury. Do wyznaczenia właściwości piany jedna komórka wydaje się być wystarczająca.



Rys. 4.9. Model pojedynczej komórki z zadanymi warunkami brzegowymi symulującymi ciągłość struktury

Używając modelu przedstawionego na rys. 4.9 zasymulowano osiowe ściśnięcie struktury o 0,1 mm. Odpowiada to odkształceniu równemu $\varepsilon = 0,1$. Odczytując z modelu siłę potrzebną do wytworzenia takiego odkształcenia wyznaczono zastępczy moduł Younga dla struktury, który wyniósł 3232 MPa. Stosując wzór (4.14) można było wyznaczyć stałe C_1 oraz C'_1 . Ze względu na fakt, że cała masa zgromadzona była w elementach powłokowych, współczynnik Ø wynosi 0, zatem parametr C_1 może zostać pominięty. Stała C'_1 wynosi natomiast 0,833. Stwierdzenie to nie jest prawdziwe w przypadku, gdy rozpatrywany jest wpływ brzegu struktury na jego wytrzymałość. Wtedy uproszczenia takiego modelu są zbyt duże. Ostatecznie dla wnętrza struktury otrzymany wzór przyjmuje postać:

$$\frac{E_c}{E_s} = 0,833 \cdot \bar{\rho} \tag{4.18}$$

Należy wzór ten zestawić, ze wzorem 4.8 otrzymanym dla piany o komórkach otwartych, dla której zastępczy moduł Younga zależy od kwadratu gęstości względnej. Na podstawie powyżej opisanego modelu można było również wyznaczyć stałą Poissona dla struktury piany, sprawdzając deformacje w kierunku poprzecznym do obciążenia. Zastępcza stała Poissona dla struktury wynosiła 0,305. Posługując się wzorem 4.10 można wyznaczyć stałą Poissona dla struktury o otwartych komórkach i tej samej gęstości względnej, wyniesie ona 0,460. Oznacza to, że struktury o otwartych komórkach są znacznie mniej ściśliwe objętościowo.

W przypadku poddawania obciążeniu granicznemu struktura piany szklanej ulega uszkodzeniu. Destrukcja struktury inicjuje się zwykle na krawędzi próbki. Z tego względu efekty brzegowe powinny być brane pod uwagę. Taka analiza wymaga znacznie większego modelu, składającego się z wielu komórek. Rysunek 4.10 przedstawia strukturę spienionego szkła (struktura o komórkach zamkniętych) składającą się z 4,75×4,75×4,75 komórek (bazując na elementarnej komórce przedstawionej na rys. 4.9).



Rys. 4.10. Struktura spienionego szkła o zamkniętych komórkach zbudowana w oparciu o komórkę elementarną (4,75×4,75×4,75 komórek)

Model składał się z 72930 elementów SHELL43 oraz zawierał 69069 węzłów. Można uznać go za wycięty z większej struktury. Dlatego konieczne jest zastosowanie odpowiednich warunków brzegowych, by w sposób prawidłowy odwzorować zachowanie się układu. Na płaszczyznach cięcia przyłożono warunek symetrii (odebrano ruch w kierunku normlanym do powierzchni oraz odebrano obroty wokół osi prostopadłych do płaszczyzny cięcia.

W ramach prowadzonych badań dokonano analizy nieustalonej wymiany ciepła wewnątrz struktury spienionego szkła. Do tej analizy posłużono się modelem 5x5x5 komórek, który dodatkowo został zmodyfikowany. Obecny wewnątrz struktury gaz został zamodelowany w postaci elementów bryłowych. Dodane one zostały w celu uwzględnienia przewodzenia ciepła poprzez gaz. Model ten jest przedstawiony na rys. 4.11. Elementy bryłowe w porównaniu do elementów powłokowych posiadają tylko trzy stopnie swobody w zadaniu strukturalnym (trzy przemieszczenia). W przypadku analizy wymiany ciepła każdy węzeł (elementu powłokowego oraz bryłowego) posiada tylko jeden stopień swobody – temperaturę. Model do zagadnienia nieustalonej wymiany ciepła składał się 84000 elementów SHELL57 oraz 1387645 elementów SOLID70; zawierał 298427 węzłów.



Rys. 4.11. Dyskretyzacja modelu: a) struktura piany, b) objętości wypełnione przez gaz

5. Badania eksperymentalne

Przeprowadzono badania próbek spienionego szkła w warunkach ściskania jednoosiowego. W ich trakcie rejestrowano pole odkształceń próbki metodą cyfrowej korelacji obrazu (DIC). Badania miały na celu wyznaczenie wytrzymałości spienionego szkła przy zastosowaniu różnych sposobów wprowadzenia obciążenia na powierzchnię próbki oraz polową rejestrację mechanizmu zniszczenia (pękania) piany. Na podstawie badań materiałowych przeprowadzono weryfikację wyników obliczeń modelowych MES.

5.1. Cyfrowa korelacja obrazu

Aby uzyskać jak najwięcej danych z przeprowadzanych prób posłużono się metodą cyfrowej korelacji obrazu DIC (ang. Digital Image Correlation). Jest to metoda optyczna, która pozwala na wyznaczenie pól odkształceń i przemieszczeń na podstawie zarejestrowanych zdjęć lub filmów. Z tego powodu zyskała ona bardzo dużą popularność w dziedzinie badań eksperymentalnych. Jest to metoda optyczna, opracowana pod koniec XX wieku i występuje ona w dwóch wariantach: dwuwymiarowej [49] oraz trójwymiarowej [50]. Niezależnie od wariantu metody, polega ona na śledzeniu punktów charakterystycznych na rejestrowanym obrazie. O powszechności stosowania tej metody decyduje łatwość jej implementacji. Do jej zastosowania wymagana jest kamera (dla korelacji dwuwymiarowej; w przypadku trójwymiarowej wymagana jest większa ilość rejestratorów), odpowiednie oświetlenie oraz oznakowanie powierzchni próbki. Oznakowanie próbki polega na naniesieniu na jej powierzchnię punktów charakterystycznych, na podstawie których możliwa będzie korelacja obrazu. Stosuje się do tego odpowiednie naklejki z nadrukiem, ewentualnie wzór może zostać naniesiony przez proszek drukarski lub malowanie natryskowe. W przypadku niektórych materiałów nie jest wymagane nanoszenie dodatkowych znaczników, ponieważ sama powierzchnia tych ciał już je posiada. Przykładem takiego materiału jest spienione szkło, w którym punktami charakterystycznymi są jego własne komórki. Jedynym procesem, jakiemu poddano próbki przed testami, było naniesienie na ich powierzchnie białej farby. Miało to na celu zmatowienie powierzchni próbek, by zapobiec odbijaniu się światła użytego w celu odpowiedniego naświetlenia obszaru badanego. Jest to powszechnie stosowana praktyka dla materiałów, których powierzchnia jest błyszcząca. Rysunek 5.1a prezentuje powierzchnię spienionego szkła przed naniesieniem warstwy matującej. Powierzchnia materiału pozwala na wybranie punktów charakterystycznych, jednak widoczne są również refleksy światła powstałe podczas wykonywania zdjęcia. Powierzchnia spienionego szkła po naniesieniu warstwy białej farby została przedstawiona na rys. 5.1b. Widać znaczący spadek refleksów światła, powierzchnia próbki stała się matowa.



Rys. 5.1. a) Próbka spienionego szkła przed naniesieniem warstwy matującej, b) próbka z naniesioną warstwą białej farby

W cyfrowej metodzie korelacji obrazu, jak wskazuje sama nazwa, chodzi o porównywanie ze sobą kolejnych zdjęć próbek poddawanych obciążeniu. Stan z pierwszego zdjęcia przyjmowany jest zazwyczaj za nieobciążony. Na jego postawie tworzone są podobszary (ang. subset), które są poszukiwane i wpasowywane na kolejnych zdjęciach. W trakcie korelacji wyznaczone podobszary zdjęcia moga być ściskane, rozciągane, ścinane, obracane oraz przesuwane. Podobnie jak w przypadku metody elementów skończonych stosuje się predefiniowane funkcje kształtu, które ułatwiają analizę wewnątrz tych obszarów. Na podstawie operacji, jakie można dokonać na tych obiektach, określany zostaje stan wewnątrz analizowanej próbki. Zazwyczaj w trakcie pojedynczej analizy definiuje się stały rozmiar podobszarów. Wraz z jego rozmiarem wzrasta precyzja korelacji obrazu, ale powoduje to uśrednianie wyników z większego obszaru. Utrudnia to analizę blisko brzegu lub w miejscach przerwania ciągłości materiału. W przypadku dwuwymiarowej korelacji obrazu zakłada się płaski stan odkształcenia analizowanego obszaru w celu uniknięcia niedokładności wyników analizy. Zalecane jest, by płaszczyzna próbki była prostopadła do rejestratora obrazu. W analizowanym przypadku próbki miały kształt cylindryczny, główny obszar analizy zlokalizowany był w ich środku, z tego powodu kształt próbki miał niewielki wpływ na wyniki badań. W przypadku analizy trójwymiarowej konieczna jest kalibracja rejestratorów obrazu w celu ustalenia pozycji oraz ogniskowych użytych kamer. Dla analizy dwuwymiarowej krok ten nie jest konieczny. W badaniach posłużono się aplikacją metody DIC opisaną w [51].

5.2. Próba osiowego ściskania z uwzględnieniem różnych warunków podparcia

Wykonano serię badań eksperymentalnych, aby lepiej zrozumieć zagadnienie mechanizmu zniszczenia struktury spienionego szkła. W trakcie ich trwania dokonano szeregu obserwacji oraz pomiarów. Eksperyment polegał na próbie ściskania próbek wykonanych ze spienionego szkła z uwzględnieniem różnych wariantów podparcia. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8516 (rys. 5.2). W trakcie trwania eksperymentu przebieg siły oraz przemieszczenia siłownika rejestrowane były przy pomocy instrumentów pomiarowych w jakie wyposażona została maszyna przez producenta. Dodatkowo w trakcie próby dokonano rejestracji obrazu w postaci zdjęć przy pomocy aparatu fotograficznego marki NIKON. Stanowisko pomiarowe zaprezentowane zostało na rys. 5.2. Do eksperymentu przygotowano próbki wycięte z bloku spienionego szkła FOAMGLAS® wyprodukowanego przez firmę Pittsburgh Corning (rys. 5.3).



Rys. 5.2. Stanowisko pomiarowe - maszyna wytrzymałościowa INSTRON 8516



Rys 5.3. Fragment bloku spienionego szkła - FOAMGLAS®

Aby uniknąć wpływu wyboczenia na zachowanie się próbek podczas procesu ściskania zadbano o to by były one krępe. Próbki miały postać cylindrów o wysokości *H* 30 mm i średnicy *D* 33 mm. Rysunek 5.4 prezentuje szkic próbki przygotowanej na potrzeby próby wytrzy-małościowej.



Rys. 5.4. Geometria próbki przygotowanej na potrzeby próby wytrzymałościowej

Przygotowano trzy zestawy próbek, oznaczone kolejno literami G, R oraz F. Seria próbek G wykonana została z czystego spienionego szkła bez dodatkowej modyfikacji struktury. Zestaw R wzmocniony został żywicą epoksydową EPIDIAN 53 z utwardzaczem TFF. Górna i dolna powierzchnia próbki pokryta została żywicą w celu wypełnienia porów zewnętrznych. Warstwa żywicy naniesiona została za pośrednictwem papieru, który został przyklejony do powierzchni próbki. W tabeli 1.2 podano moduł Younga dla litego szkła (72 GPa). Moduł Younga żywicy EPIDIAN 53 wynosi natomiast 3,14 GPa. Oznacza to, że jest ona znacząco mniej sztywna (blisko 23 razy) od materiału rodzimego piany. W trzecim wariancie F pory na powierzchni próbek wypełnione zostały mąką typ 450 (krupczatka) wyprodukowaną przez GoodMills Polska. Jest to mąka gruboziarnista. Niemniej jednak rozmiar ziarna był znacznie mniejszy w odniesieniu do rozmiaru porów pianki. Przygotowano po siedem próbek dla każdego zestawu. Próbki oznaczono numerami od 1 do 7 oraz literką mówiącą o jej typie.

Dodatkowo na próbki naniesiono natryskowo powłokę z białej farby. Zadaniem tej powłoki było stworzenie punktów referencyjnych na powierzchni próbek w celu dalszej analizy w oparciu o metodę cyfrowej korelacji obrazu (DIC).

Przygotowane próbki podane zostały próbie ściskania na stanowisku pomiarowym przedstawionym na rys. 5.2. Rysunki 5.5–5.7 przedstawiają kolejne etapy zniszczenia dla trzech typów próbek odpowiednio: dla samego spienionego szkła, piany z żywicą oraz piany z mąką. Na rysunkach kolejne etapy oznaczono literami: a, b oraz c. Zdjęcia z oznaczeniem (a) przedstawiają próbkę przed obciążeniem, (b) oraz (c) kolejne etapy obciążania próbek.



Rys. 5.5. Próbka G1 – samo szkło: a) przed testem, b) pierwszy etap oraz c) drugi etap próby niszczącej



Rys. 5.6. Próbka R6 – szkło zewnętrznie wzmacniane żywicą: a) przed testem, b) pierwszy etap oraz c) drugi etap próby niszczącej



Rys. 5.7. Próbka F3 – z porami zewnętrznymi wypełnionymi mąką: a) przed testem, b) pierwszy etap oraz c) drugi etap próby niszczącej

Analizując przedstawione fotografie można potwierdzić wniosek wyciągnięty z rozważań teoretycznych – proces niszczenia inicjuje się na brzegu struktury i przemieszcza się do jej wnętrza (centralnej części próbki). Centralna część próbki wydaje się być niezdeformowana i pozostaje sztywna. Obserwację tę można potwierdzić przy pomocy analizy zdjęć wykonanych w trakcie przeprowadzanej próby. Bazując na metodzie cyfrowej korelacji obrazu (DIC) stworzono mapy przemieszczeń oraz odkształceń wewnątrz analizowanych próbek.

Rysunki 5.8-5.10 przedstawiają wyniki uzyskane w metodzie cyfrowej korelacji obrazu dla próbki G1. Rysunek 5.8 przedstawia przemieszczenia w kierunku osiowym, rys. 5.9 mikroodkształcenia w kierunku pionowym, natomiast rys. 5.10 odkształcenia postaciowe. Podczas narastania siły dochodziło do sekwencyjnego zgniatania struktury. Warstwy pianki szklanej sukcesywnie ulegały zniszczeniu warstwa po warstwie. Przebieg siły ściskającej w funkcji przemieszczenia dla próbek G1-G7 przedstawiono na rys. 5.11a. Uśredniona krzywa wraz z naniesionym odchyleniem standardowym przedstawiona została na rys. 5.11b. Wyniki uzyskane z próby wytrzymałościowej pokazują przyrost siły ściskającej wraz z przesuwaniem się siłownika maszyny wytrzymałościowej. Maksymalna wartość osiągnięta zostaje przy przemieszczeniu około 10 mm. W dalszej części próby następuje spadek siły. Widoczna fluktuacja na krzywych odpowiada stopniowemu załamywaniu się kolejnych warstw struktury. Maksymalna uśredniona siła spośród próbek G1-G7 wynosi 0,8 kN.



Rys. 5.8. Pionowe przemieszczenia (mm) dla próbki G1 – surowy kontakt próbki ze szczękami maszyny wytrzymałościowej: a) pierwszy etap niszczenia, b) drugi etap niszczenia



Rys. 5.9. Mikro odkształcenia w kierunku pionowym dla próbki G1– surowy kontakt próbki ze szczękami maszyny wytrzymałościowej: a) pierwszy etap niszczenia, b) drugi etap niszczenia



Rys. 5.10. Mikro odkształcenia postaciowe dla próbki G1– surowy kontakt próbki ze szczękami maszyny wytrzymałościowej: a) pierwszy etap niszczenia, b) drugi etap niszczenia



Rys. 5.11. Przebiegi sił w próbie ściskania dla próbek z surowym kontaktem ze szczękami maszyny wytrzymałościowej: a) siła ściskająca w funkcji przemieszczenia dla próbek G1–G7, b) uśredniona krzywa wraz z odchyleniem standardowym ± S

Ten sam eksperyment powtórzono dla pianki z porami zewnętrznymi wypełnionymi na powierzchni żywicą (próbki oznaczone literą R). Żywica zapewnia płaskość obu powierzchni styku próbki oraz lepsze przyleganie do powierzchni maszyny wytrzymałościowej. Rysunek 5.6 przedstawia zdjęcia próbki R6 przed i w trakcie procesu niszczenia – rys. 5.6b po oderwaniu górnej warstwy żywicy, rys. 5.6c po oderwaniu dolnej warstwy żywicy przylegającej do powierzchni próbki. Rysunek 5.12 przedstawia przemieszczenia pionowe dla próbki R6 uzyskane metodą cyfrowej korelacji obrazu. Rysunek 5.13 prezentuje mikro-odkształcenia w kierunku pionowym, rys. 5.14 natomiast mikro-odkształcenia postaciowe. Charakter zniszczenia jest podobny do próbek typu G. Degradacja struktury następuje warstwa po warstwie, a środkowa część pianki pozostaje (nienaruszona). Różnice między tymi dwoma typami próbek widoczne są na krzywych przedstawiających zależność siły ściskającej od przemieszczenia (rys. 5.11 oraz rys. 5.15). W początkowej fazie obciążania próbka z żywicą wykazuje dużą odporność. Siła wzrasta do około 0,52 kN, a następnie spada do 0,05 kN. Spowodowane jest to różnicą w sztywności dwóch materiałów: szkła i żywicy. Warstwa z żywicą zostaje oderwana od struktury (następuje ich separacja). Na późniejszym etapie siła przyrasta ponownie do 0,6 kN dla przemieszczenia 10 mm (rys. 5.15). Maksymalna uzyskana średnia siła 0,8 kN jest taka sama jak dla próbek wykonanych z samego szkła. Próbki z żywicą początkowo stawiają większy opór, natomiast w przypadku próbek typu G kolejne warstwy są szybko niszczone, bez żadnego oporu. W pewnym momencie, po zniszczeniu kilku warstw, obserwuje się przyrost odporności struktury. Spowodowane jest to procesem wypełniania pustych przestrzeni komórkowych materiałem powstałym w wyniku kruszenia krawędzi komórek. Dzięki temu siła nie jest przenoszona jedynie przez krawędzie komórek, ale jej część przenoszona jest przez powierzchnie w postaci równomiernie rozłożonego nacisku. Pozwala to na zwiększenie nośności struktury.



Rys. 5.12. Pionowe przemieszczenia (w mm) dla próbki R6 – próbka wzmacniana na powierzchni żywicą: a) pierwszy etap niszczenia, b) drugi etap niszczenia



Rys. 5.13. Mikro odkształcenia w kierunku pionowym dla próbki R6 – próbka wzmacniana na powierzchni żywicą: a) pierwszy etap niszczenia, b) drugi etap niszczenia



Rys. 5.14. Mikro odkształcenia postaciowe dla próbki R6 – próbka wzmacniana na powierzchni żywicą: a) pierwszy etap niszczenia, b) drugi etap niszczenia



Rys. 5.15. Przebieg sił w próbie ściskania dla próbek wzmacnianych powierzchniowo żywicą: a) siła ściskająca w funkcji przemieszczenia dla R1–R7, b) uśredniona krzywa wraz z odchyleniem standardowym ± S

Jako ostanie omówione zostaną próbki typu F – z porami zewnętrznymi wypełnionymi mąką. Rysunek 5.7 przedstawia zdjęcia próbki F3 przed próbą (rys. 5.7a) oraz podczas dwóch

etapów obciążania (rys. 5.7b oraz rys. 5.7c). Obrazy te różnią się znacznie od poprzednio prezentowanych. Zauważyć na nich można pęknięcia struktury pianki szklanej. Początek pęknięcia jest prawie niewidoczny na rys. 5.7b, ale uwidacznia się rys. 5.7c. Pękniecie rozciąga się od góry do dołu próbki. Obserwacje są zgodne z wynikami uzyskanymi z cyfrowej korelacji obrazu. Mapy przemieszczeń pionowych potwierdzają początek pęknięcia (rys. 5.16a) oraz jego propagację (rys. 5.16b). Uszkodzenia i powstanie pęknięć wewnątrz struktury można również potwierdzić mapami odkształceń linowych oraz postaciowych (rys. 5.17 i 5.18). Rysunek 5.19a prezentuje krzywe wyrażające zależność siły ściskającej od przemieszczenia głowicy dla siedmiu próbek typu F (piana z mąką). Na ich podstawie można stwierdzić, że w początkowej fazie obciążania zachowanie próbek typu F (moduł sztywności – nachylenie krzywej) mieści się w zakresie pomiędzy próbkami G i R. Próbki F są sztywniejsze niż G, ale mniej sztywne niż R. W miarę narastania obciążenia dochodzi do rozerwania struktury, co wyraźnie widać rys. 5.7c, gdy przemieszczenie próbki osiągnęło około 4 mm. Maksymalna średnia siła ściskająca dla tego typu próbek wynosiła około 0,6 kN, a średnie przemieszczenie 5 mm (rys. 5.19b). Dalej następuje już tylko spadek siły jaką jest w stanie przenieść struktura.



Rys. 5.16. Pionowe przemieszczenia (w mm) dla próbki F3 – próbka z porami zewnętrznymi wypełnionymi mąką: a) początek pękania, b) propagacja pęknięcia



Rys. 5.17. Mikro odkształcenia w kierunku pionowym dla próbki F3 – próbka z porami zewnętrznymi wypełnionymi mąką: a) początek pękania, b) propagacja pęknięcia



Rys. 5.18. Mikro odkształcenia postaciowe dla próbki F3 – próbka z porami zewnętrznymi wypełnionymi mąką: a) początek pękania, b) propagacja pęknięcia



Rys. 5.19. Przebiegi sił w próbie ściskania próbek z porami zewnętrzymi wypełnionymi mąką: a) siła ściskająca w funkcji przemieszczenia dla próbek F1–F7, b) uśredniona krzywa wraz z odchyleniem standardowym ± S

Analiza porównawcza wszystkich uzyskanych danych jest przedstawiona na rys. 5.20 oraz w tabeli 5.1. Próbki typu G (samej pianki szklanej) i typu R (pianki szklanej pokrytej warstwą żywicy) osiągają podobne wyniki z wyjątkiem etapu początkowego (rys. 5.20a). Próbki z żywicą charakteryzują się większym oporem w początkowej fazie obciążania (odkształcenie sprężyste do punktu oderwania się warstwy z żywicą – rys. 5.20b), podczas gdy próbka wykonana z samego spienionego szkła ulegała destrukcji od samego początku. Wynika to z nieregularności powierzchni. Nierównomiernie rozłożone obciążenie wyłamuje i kruszy wystające elementy. Powoduje to, że dla tego rodzaju próbki nie występuje sprężysty fragment charakterystyki. Struktura ulega uszkodzeniu od samego początku obciążania. Maksymalna siła ściskająca dla obu próbek wynosiła około 0,8 kN dla przemieszczenia około 10 mm. W przypadku próbek z mąką zauważyć można spadek maksymalnej siły do poziomu 0,6 kN.



Rys. 5.20. Porównanie średniej siły ściskającej w funkcji przemieszczenia: a) podczas całego eksperymentu, oraz b) etapu początkowego dla samej piany (—AVG-G), z żywicą (—AVG-R) oraz mąką (—AVG-F)

Odpowiada to wymuszeniu kinematycznemu równemu 5 mm. Spowodowane jest to bocznym rozsadzaniem wewnętrznej struktury przez mąkę. W przypadku mąki obciążanie można podzielić na dwa liniowe zakresy. Pierwszy dotyczy zakresu elastycznego, w którym mąka zabezpiecza strukturę przed wyłamywaniem się wystających jej elementów. W drugim natomiast mąka powoduje rozpychanie struktury oraz wnikanie do jej wnętrza. Nachylenie linii aproksymującej przyrost obciążenia dla próbek typu R jest dwa razy większe niż w przypadku próbek typu F (oznacza to, że próbki z żywicą są również dwa razy sztywniejsze niż z mąką). Porównując uzyskane wyniki widać, że maksymalna uśredniona siła dla próbek R była równa 0,826 kN przy odchyleniu standardowym 0,098 kN. Biorąc pod uwagę powierzchnię okrągłej

próbki (średnica 33 mm), naprężenie krytyczne wynosiło 0,966 MPa. Ciekawym aspektem, na który należy zwrócić uwagę, są przebiegi sił dla poszczególnych próbek przedstawionych na rys. 5.11, 5.15 oraz 5.19. Charakterystyczny jest dla nich stochastyczny przebieg wokół średniej. Nagłe piki powyżej oraz poniżej krzywej spowodowane są najprawdopodobniej faktem, że poszczególne warstwy struktury wycięte z jednego bloku szkła mogą mieć różną nośność. Pokazuje to złożone zachowanie się materiału jakim jest spienione szkło.

Typ próbki	Maksymalna siła ściskająca [kN]	Odchylenie standardowe maksymalnej siły ściskającej [kN]	Maksymalne naprężenia [MPa]	Odchylenie standardowe maksymalnych naprężeń [MPa]
G (sama pianka)	0,800	0,101	0,935	0,118
R (pianka z żywicą)	0,826	0,098	0,966	0,115
F (pianka z mąką)	0,605	0,125	0,707	0,146

Tabela 5.1. Zestawienie wyników z próby wytrzymałościowej

W rozdziale 1 wspomniano przypadek awarii zbiornika do przechowywania asfaltu. Warstwa izolacyjna wykonana ze spienionego szkła, która uległa uszkodzeniu, ułożona została na warstwie żwiru. W przeprowadzonym eksperymencie wykazano, że niespójne sypkie podparcie struktury spienionego szkła (reprezentowane przez mąkę) powoduje obniżenie jej globalnej nośności. Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu można stwierdzić, że zabezpieczanie brzegu spienionego szkła wpływa pozytywnie na jego zachowanie (próbki typu G), ale zastosowane wypełnienie może powodować nierównomierność nacisku na strukturę piany, a w efekcie znacząco może pogorszyć jego bazową wytrzymałość (próbki typu F).

5.3. Pomiar ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury spienionego szkła

Głównym obszarem zastosowań spienionego szkła jest sektor budownictwa, gdzie stosowane jest ono jako izolator. Dobre parametry izolacyjne tego surowca wynikają bezpośrednio z cech materiału bazowego, jak również z jego specyficznej struktury wewnętrznej. Spienione szkło jest materiałem dwufazowym. Poza szkłem w jego wnętrzu znajdują się zamknięte komórki wypełnione gazem. Gaz zamknięty wewnątrz struktury jest pozostałością po procesie spieniana. Ważne jest zbadanie wpływu tego gazu na wytrzymałość i zachowanie się struktury. Dlatego podjęto się oszacowania ciśnienia tego gazu. Początkowo założono, że ciśnienie wewnątrz struktury, w celu jej utrzymania na etapie wytwarzania, powinno być wyższe od ciśnienia atmosferycznego i finalny produkt powinien cechować się

nadciśnieniem. W tym celu zbudowano stanowisko pomiarowe składające się z elementów przedstawionych na rys. 5.21. Składało się ono z:

- 1) rury wykonanej z poliwęglanu o średnicy wewnętrznej 70 mm i długości 240 mm,
- 2) kołnierzy stalowych z uszczelnieniem w postaci o-ringów,
- 3) zaworów umożliwiających montaż manometrów,
- 4) manometru wyskalowanego do 6 barów w klasie dokładności 1.6 (błąd pomiaru wynosi 1.6% podziałki),
- 5) gwintowanych prętów, których zadaniem było skręcenie i prowadzenie kompresji na elementach uszczelniających,
- 6) gniazda umożliwiającego wprowadzenie wału napędzającego ostrze kruszące szkło.



Rys. 5.21. Elementy stanowiska badawczego do pomiaru ciśnienia gazu wewnątrz spienionego szkła w wariancie I

Rysunek 5.22 prezentuje zmontowane stanowisko pomiarowe wraz z zainstalowaną próbką. W górnej części rysunku widać wał umożliwiający napędzanie ostrza służącego do niszczenia próbki. Jest ono widoczne tuż ponad próbką. Wał uszczelniono przy pomocy gumowego o-ringu, aby móc zapewnić jego obroty oraz ruch osiowy w celu możliwości zniszczenia całej próbki. Ostrze napędzane było przy pomocy silnika elektrycznego o mocy 650 W. Ze względu na niewielki rozmiar komórek piany (około 1mm) do eksperymentu przygotowano większe próbki w porównaniu do tych użytych w teście na ściskanie próbki, aby łatwiej było dokonać pomiaru zmiany ciśnienia wewnątrz cylindra pomiarowego. Wykorzystane próbki miały następujące wymiary: 69 mm średnicy oraz 200 mm wysokości (rys. 5.23).



Rys. 5.22. Zmontowane stanowisko pomiarowe do pomiaru ciśnienia w wariancie I z zainstalowaną próbką



Rys. 5.23. Walcowa próbka do pomiaru ciśnienia wewnętrznego - wariant I

Ze względu na problemy techniczne związane z uszczelnieniem układu przy wale napędowym ostrza oraz niewielkimi wahaniami ciśnienia nie udało się dokonać pomiaru ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury spienionego szkła. Z powodu niemożności przełamania ograniczeń technicznych zdecydowano się na zmianę podejścia do problemu. Zrezygnowano z próby zmierzenia wahania się wartości ciśnienia gazu. Zamiast tego postanowiono zmierzyć objętość uwolnionego gazu. Na podstawie jego objętości można oszacować jego ciśnienie wewnątrz struktury (na podstawie równania stanu gazu doskonałego Clapeyrona (4.1)). Zakładając, że uwolnienie gazu nastąpi w przemianie izotermicznej równanie (4.1) sprowadzić można do postaci:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \tag{5.1}$$

gdzie: 1 – oznacza parametry gazu zamkniętego wewnątrz struktury, 2 – parametry gazu uwolnionego ze struktury.

Poza założeniem izotermiczności procesu zakłada się, że uwolniony gaz będzie miał ciśnienie równe ciśnieniu atmosferycznemu. Należy oszacować objętość gazu wewnątrz próbek. Do eksperymentu przygotowano próbki o średnicy D = 35 mm oraz H = 110 mm (rys. 5.24). Objętość próbek przewidzianych do badań wynosiła Vp = 105832,4 mm³ = 105,8 ml. Średnia masa przygotowanych próbek wynosiła 13,76 g. Odpowiada to deklarowanej przez producenta gęstości spienionego szkła wynoszącej 130 kg m⁻³ (tabela 1.4). Na podstawie gęstości szkła sodowo wapiennego (2500 kg m⁻³ – tabela 1.2) oraz gęstości spienionego szkła wyznaczono udział objętościowy szkła na 5,2%. Ze względu na otwartość komórek zlokalizowanych na powierzchni, objętość próbki pomniejszono o głębokość jednego rzędu komórek (1 mm). Finalna objętość gazu wewnątrz każdej próbki oszacowana została na $V_g = V_1 = 87568,9$ mm³ = 87,6 ml.



Rys. 5.24. Walcowa próbka do pomiaru ciśnienia wewnętrznego - wariant II

Do uwolnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury wykorzystano zestaw przedstawiony na rys. 5.25. Próbka spienionego szkła włożona została do szczelnie zamkniętej tuby. Wolne przestrzenie wewnątrz tuby wypełnione zostały wodą destylowaną. Przesuwając tłok dokonywana była kompresja piany i otwieranie się zamkniętych porów. Na zewnątrz tuby wypychana była woda oraz wydzielany gaz za pośrednictwem gumowego przewodu. Zbierane były one w zlewce odwróconej dnem do góry, również wypełnionej wodą destylowaną. Uchodzący gaz jako mniej gęsty zbierał się przy jej dnie wypychając wodę. Proces został przedstawiony na rys. 5.26.

Po całkowitym zniszczeniu próbki zmierzono objętość uzyskanego gazu. Tabela 5.2 zawiera pomierzoną objętość gazu. Przekształcając równanie (5.1) otrzymać można wzór do wyznaczenia ciśnienia gazu wewnątrz struktury:

- -



$$p_1 = \frac{p_2 V_2}{V_1} \tag{5.2}$$

Rys. 5.25. Zestaw do uwalniania gazu ze spienionego szkła - wariant II



Rys. 5.26. Proces zbierania gazu uwolnionego w trakcie procesu niszczenia próbek

Tabela 5.2 zawiera wyniki pomiarów ciśnienia wyznaczone wewnątrz struktury na podstawie wzoru (5.2). Prezentuje ona wartości ciśnienia absolutnego oraz względnego względem ciśnienia atmosferycznego.

rubela 3.2. Wyniki orzyniane w rukele badan eisinenna gaza zankinętego wewnątrz struktury					
Numer próbki	Zmierzona objętość gazu v2 [ml]	Ciśnienie gazu wewnątrz struktury p ₁ [bar] – absolutne	Ciśnienie gazu wewnątrz struktury p1 [bar] – względem otoczenia		
1	151	1,72	0,72		
2	11	0,13	-0,87		
3	12	0,14	-0,86		
4	10	0,11	-0,89		
5	11	0,13	-0,87		
6	15	0,17	-0,83		
7	145	1,66	0,66		

Tabela 5.2. Wyniki otrzymane w trakcie badań ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury

Pomiar objętości uwolnionego gazu okazał się znacznie prostszy i mniej wymagający laboratoryjnie. Na podstawie uzyskanych pomiarów i przeliczeń można stwierdzić znaczący rozrzut wyznaczonych wartości ciśnienia wewnątrz struktury. Ciśnienie wewnętrzne może przybierać wartość od 0,72 bara nadciśnienia do 0,89 bara podciśnienia. Oznacza to, że pierwotnie przyjęte założenie o nadciśnieniu działającym wewnątrz struktury względem ciśnienia zewnętrznego było niewłaściwe. Uznać można, że dominującym stanem wewnątrz struktury jest podciśnienie, a jedynie lokalnie zdarzają się strefy z nadciśnieniem. Na podstawie dokonanych pomiarów średnia wartość podciśnienia wynosi 0,42 bara, a odchylenie
standardowe wynosi 0,7. Tak duża zmienność tego parametru może wynikać z nierównomierności dystrybucji czynnika spieniającego dodawanego w trakcie wytwarzania produktu. Nakładając to na dużą niepewność danych materiałowych, jakie są dostępne dla szkła, okazuje się, że ciśnienie wewnętrzne wewnątrz spienionego szkła może być kolejną zmienną.

6. Wyniki analiz numerycznych

6.1. Mechanizm zniszczenia spienionego szkła oraz optymalizacja metody wprowadzenia siły do układu

W rozdziale tym rozważany będzie wpływ gazu zamkniętego wewnątrz statury na jej wytrzymałość w wyniku odziaływań sił zewnętrznych. Analizie podany zostanie również wpływ metody wprowadzenia siły do wnętrza struktury na jej własności wytrzymałościowe.

6.1.1. Oszacowanie wpływu ciśnienia gazu w porach na możliwość zniszczenia struktury spienionego szkła

Zagadnieniem podejmowanym w tym rozdziale jest mechanizm zniszczenia spienionego szkła w wyniku odziaływania zewnętrznego obciążenia na strukturę. Należy w tym miejscu również uwzględnić wpływ gazu wypełniającego przestrzeń wewnątrz zamkniętych komórek. Gaz ten jest pozostałością po procesie produkcji piany. W rozdziale 5.3 na drodze eksperymentu oszacowano ciśnienie tego gazu. Na podstawie przeprowadzonych badań można zauważyć duży rozrzut wartości tego parametru. Dominującym stanem jest podciśnienie względem ciśnienia atmosferycznego. Niemniej jednak występują obszary wewnątrz piany, gdzie panuje nadciśnienie względem ciśnienia atmosferycznego. W rozdziale 3.2 opisano metodę wytwarzania spienionego szkła na skalę przemysłową z granulatu szklanego z zastosowaniem czynnika spieniającego. Po osiągnieciu przez mieszaninę temperatury powyżej 850°C topiące się szkło zamyka cząsteczki czynnika spieniającego, który następnie ulega rozkładowi i powstaje faza gazowa. Wzrost ciśnienia powoduje wzrost pęcherzy gazu. Po całkowitym utrwaleniu się struktury gaz użyty do produkcji piany pozostaje zamknięty w jej wnętrzu. W każdej zamkniętej komórce ciśnienie działa na ścianki w kierunku normalnym do nich. W przypadku komórki wewnętrznej ciśnienie działa na ściankę po obydwu jej stronach (rys. 6.1a). Jeśli rozważana będzie komórka zlokalizowana na krawędzi struktury, gaz będzie wywierał ciśnienie na ściankę tylko z jednej strony (rys. 6.1b). Na podstawie badań eksperymentalnych można stwierdzić, że ciśnienie wewnątrz struktury nie jest stałe w całej jej objętości, niemniej jednak na poziomie dwóch sąsiednich komórek można założyć z dobrym przybliżeniem, że ciśnienie wewnątrz tych komórek jest takie samo. Słuszność tego założenia wynika z konieczności powstania równowagi pomiędzy pęcherzami gazu w procesu spieniania szkła. Dlatego przyjmując założenie małych odkształceń, stany przedstawione na rys. 6.1a oraz rys. 6.1b można zastąpić tymi przedstawionymi na rys. 6.1c i rys. 6.1d. W trakcie prowadzonych badań udało się stwierdzić, że ciśnienie wewnątrz struktury może zmieniać się od -0,89 bara do 0,72 bara względem ciśnienia atmosferycznego (tabela 5.2). Z tego powodu rozważono te dwa skrajne przypadki. Oba poziomy ciśnienia zostały przyłożone do powierzchni zewnętrznych (swobodnych – ścianka przednia, prawa oraz górna) modelu MES zaprezentowanym na rys. 4.10 zgodnie z uproszczeniem przedstawionym na rys. 6.1. Dzięki temu zbadany został wpływ tego gazu na samą strukturę.



Rys. 6.1. Schemat odziaływania ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury piany: a) ciśnienie działa ze wszystkich stron na ścianki komórki, b) ciśnienie działa na zewnętrzną komórkę, c) brak wpływu gazu oraz d) ciśnienie działa od strony zewnętrznej komórki

Ze względu na kruchość materiału jakim jest szkło do oceny wpływu ciśnienia wewnątrz struktury na jej zachowanie zostaną wykorzystane kryteria wytrzymałościowe opisane w rozdziale 3.6: hipoteza Coulomba-Mohra oraz Galileusza-Rankine'a. Dlatego w celu poszukiwania krytycznych lokalizacji wewnątrz struktury obserwowane będą naprężenia w kierunkach głównych σ_1 oraz σ_3 . Rysunek 6.2 prezentuje otrzymane rozkłady naprężeń dla przypadku piany z podciśnieniem (-0.89 bara), natomiast rys. 6.3 – dla przypadku nadciśnienia (0,72 bara). Na podstawie zaprezentowanych rozkładów można stwierdzić, że najbardziej wytężonymi obszarami struktury są duże płaskie powierzchnie czternastościanu foremnego. Maksymalne naprężenia główne σ_1 w przypadku podciśnienia wynoszą 16,31 MPa (σ_3 dla tej lokalizacji są równe 0,00, rys. 6.4) dla nadciśnienia największe naprężenia rozciągające σ_1 wynoszą 15,77 MPa $(\sigma_3=0.07 \text{ MPa})$. W celu wyznaczenia krytycznych lokalizacji oraz współczynnika wykorzystania nośności materiału według hipotezy Mohra odczytano dla każdego węzła naprężenia σ_1 oraz σ_3 dla powierzchni wewnętrznej oraz zewnętrznej. Następnie naprężenia główne zostały unormowane do wartości Rc oraz Rr oraz na podstawie wzoru (3.13) wyliczony został współczynnik k dla każdego węzła dla obu powierzchni. Następnie wybrana została maksymalna jego wartość dla każdego rozpatrywanego przypadku. Na jego podstawie wyliczono współczynnik bezpieczeństwa jako odwrotność współczynnika wykorzystania nośności materiału (wzór 3.14). Dla przypadku podciśnienia (0.89 bara) współczynnik bezpieczeństwa według hipotezy Mohra



Rys. 6.2. Rozkład naprężeń dla próbki spienionego szkła obciążonej podciśnieniem o wartości 0,89 bara



Rys. 6.3. Rozkład naprężeń dla próbki spienionego szkła obciążonej nadciśnieniem o wartości 0,72 bara

wynosi 1.16. Rysunek 6.4 przestawia mapy naprężeń dla krytycznej lokalizacji. Współczynnik bezpieczeństwa według hipotezy Rankine'a dla przypadku podciśnienia wynosi 1.16. Podobnie dla przypadku nadciśnienia współczynnik bezpieczeństwa według hipotezy Mohra wynosi 1,20. Dla hipotezy Rankine'a równy jest on również 1,20. Widać, że są to poziomy naprężeń zbliżone do limitu wytrzymałości szkła. W rozważanych przypadkach hipoteza Rankine'a i Mohra dają takie same współczynniki bezpieczeństwa. Na ich podstawie można stwierdzić, że możliwe jest zaistnienie tak dużych różnic ciśnień wewnątrz struktury, które mogą doprowadzić do otwarcia się komórek. Kolejnym aspektem, o jakim należy pamiętać, jest naturalna adaptacja kształtu struktury. Widać, że ścianki poddawane ciśnieniu wybrzuszają się, optymalizując swój kształt do działającego ciśnienia. Podobny efekt może mieć miejsce również w trakcie formowania się piany w przypadku znaczących różnic ciśnień pomiędzy komórkami. Niestety cięcie piany na bloki po jej wytworzeniu usuwa ten efekt samo-przystosowania się mikrostruktury.



Rys. 6.4. Rozkład naprężeń na ściance spienionego szkła obciążonej podciśninem o wartości 0,89 bara (strona zewnętrzna): a) naprężenia w kierunku głównym σ_1 , b) naprężenia w kierunku głównym σ_3

Bazując na liniowości modelu można wyznaczyć również współczynniki bezpieczeństwa dla stanu 1 bara podciśnienia (1,04 hipoteza Mohra, 1,04 hipoteza Rankine'a) oraz 1 bara nadciśnienia (0,87 hipoteza Mohra; 0,87 hipoteza Rankine'a). Na ich podstawie widać, że stan nadciśnienia jest dużo groźniejszy dla struktury. Z tego powodu w trakcie procesu produkcji należy tak dopasować parametry technologiczne by finalny produkt zawierał komórki wypełnione gazem o ciśnieniu niższym od atmosferycznego.

6.1.2. Oszacowanie wpływu wprowadzenia obciążenia na możliwość zniszczenia struktury spienionego szkła

Badania eksperymentalne opisane w rozdziale 5.2 pokazały, że ogólna wytrzymałość spienionego szkła limitowana jest przez efekt brzegowy związany ze sposobem przyłożenia obciążeń zewnętrznych do konstrukcji. Dlatego analizie numerycznej poddano również trzy przebadane eksperymentalnie konfiguracje wprowadzenia obciążenia do struktury: typ G – samo spienione szkło, które ma kontakt bezpośrednio ze sztywną płaską powierzchnią, typ R – struktura piany z zewnętrznymi porami wypełnionymi żywicą epoksydową (EPIDIAN 53), oraz typ F – piana, w której pory przy powierzchni piany zostały wypełnione mąką grubo-ziarnistą typu 450. Wprowadzimy pojęcie współczynnika koncentracji naprężeń zdefiniowanego równaniem:

$$k = \frac{\sigma_{\max}}{p} \tag{6.1}$$

gdzie: p – zewnętrzne równoważne naprężenia ściskające przyłożone do struktury, σ_{max} – maksymalne naprężenia zredukowane występujące wewnątrz struktury (maksymalne naprężenie rozciągające według hipotezy Rankine'a max(σ_1)).

Współczynnik koncentracji naprężeń zależy od wielu czynników. Wymienić tu można na przykład: gęstość i rodzaj struktury, rozmiar komórek. Istotne jest aby odróżnić obszar zlokalizowany na brzegu struktury od jego wnętrza. Można to określić za pomocą relacji:

$$\sigma_{eq_{\text{internal}}} \le \sigma_{eq_{\text{external}}} \tag{6.2}$$

gdzie: $\sigma_{eq_{internal}}$ – naprężenia zlokalizowane wewnątrz struktury, $\sigma_{eq_{external}}$ – naprężenia zlokalizowane na brzegu struktury.

W konsekwencji zdefiniować można oddzielny współczynnik koncentracji naprężeń dla komórek wewnętrznych i zewnętrznych. Maksymalne naprężenia w obszarze oddalonym od krawędzi struktury (zwanym dalej "obszarem wewnętrznym") są proporcjonalne do średniego nacisku przyłożonego do struktury na obszar zewnętrzny i nie zależą od metody wprowadzenia obciążenia zgodnie z zasadą de Saint-Venanta:

$$\sigma_{eq_{\text{internal}}} = pk_{\text{internal}} \tag{6.3}$$

W przypadku obszarów położonych w pobliżu brzegu struktury maksymalne naprężenia zależą głównie od metody rozkładu średniej siły nacisku *F* na powierzchnię piany. Na podstawie poczynionych w trakcie badań eksperymentalnych obserwacji można stwierdzić, że część obciążenia przyłożonego do pianki jest bezpośrednio przenoszona przez krawędzie płyty

jako wydatek liniowy q_l (N m⁻¹), reszta natomiast transferowana jest w postaci ciśnienia p_s działającego na powierzchnie ścianek komórek. Wynikowe obciążenie jest wiec sumą tych dwóch komponentów:

$$F = F_l + F_s \tag{6.4}$$

gdzie: F_l jest silą odpowiadającą wydatkowi liniowemu q_l , a F_s jest silą odpowiadającą ciśnieniu p_s .

Korzystając z modelu MES, zamodelowano sposoby wprowadzenia obciążenia w strukturę piany przebadane eksperymentalnie. W pierwszym rozpatrywanym przypadku (typ G) jest ono przyłożone bezpośrednio do struktury spienionego szkła. W tym wariancie siła wprowadzana jest do struktury poprzez wolne krawędzie przeciętych komórek. W obliczeniach MES zamodelowane to zostało poprzez przyłożenie wymuszenia przemieszczeniowego w kierunku pionowym do węzłów zlokalizowanych na górnej krawędzi struktury. Założenie wynika z faktu, że sztywność materiału bazowego piany (szkła) wynika z blisko trzy razy mniejszego moduł Younga (72 GPa, tabela 1.2) w odniesieniu do stali (210 GPa). Wspomniane węzły zostały zaznaczone na rys. 6.5 przy użyciu czerwonej linii ciągłej.



Rys. 6.5. Schemat przykładania obciążenia do struktury spienionego szkła

Drugim rozpatrywanym przypadkiem było spienione szkło, w którym pory zlokalizowane na jego powierzchni wypełnione zostały żywicą (typ R). W tym przypadku obciążenie przenoszone jest zarówno przez krawędzie jak i powierzchnie otwartych komórek. Żywica zapewnia dodatkową sztywność blokując ruchy względne w kierunku prostopadłym do kierunku działania siły. W analizie numerycznej uwzględniono to poprzez przemieszczenie osiowe węzłów zaznaczonych niebieską linią przerywaną na rys. 6.5, z jednoczesnym zablokowaniem ruchów w kierunkach prostopadłych do kierunku wprowadzanego obciążenia. Założenie wynika z dodatkowego dosztywnienia struktury przy użyciu żywicy epoksydowej EPIDIAN 53 (jej moduł Younga wynosi 3,14 GPa). Oznacza to, że jest ona znacząco mniej sztywna od materiału bazowego piany, ale biorąc pod uwagę grubość ścianek spienionego szkła oraz wielkość porów żywica zwiększa znacząco sztywność piany w tej warstwie. Zaznaczone węzły odpowiadają pierwszemu rzędowi komórek. W wyniku tego działania wynikowa siła działa tylko w kierunku pionowym.

Ostatnim rozważanym przypadkiem była piana z porami zewnętrznymi wypełnionymi mąką (typ F). Mąka zachowuje się podobnie do płynu. Przenosi naciski na wszystkie powierzchnie, ale nie zapewnia sztywności w kierunkach prostopadłych do kierunku obciążenia. Mąka w przeciwieństwie do żywicy nie ogranicza swobody przemieszczeń struktury komórkowej w kierunku poprzecznym do obciążenia. Powoduje to, że zewnętrzne obciążenie powierzchniowe działa na skośne ściany, załamując w ten sposób strukturę pianki. Dlatego węzły z niebieskiej ramki z rys. 6.5 zostały przesunięte w dół bez żadnego dodatkowego blokowania ruchów w kierunkach prostopadłych do kierunku działania siły. Wymuszenie kinematyczne węzłów zostało tak dobrane, by dla przypadku samego spienionego szkła uzyskać wewnątrz struktury stan limitujący według hipotezy Rankine'a σ_1 =19MPa. Odpowiada to ściskaniu struktury wymuszeniem równym 0,31 MPa (równoważne jest to sile ściskającej 0,27kN w trakcie próby wytrzymałościowej). Jest to poziom obciążenia, przy którym w trakcie próby wytrzymałościowej opisanej w rozdziale 5.2 badane próbki wychodziły poza zakres liniowy (rys. 5.20). Obciążenie to wyznaczono jako siłę równomiernie rozłożoną na zastępczej powierzchni fragmentu struktury złożonej z 4,75×4,75 komórek. Rozmiar komórki elementarnej przyjęto jako 1 mm.

Wykorzystując wyżej opisane założenia dotyczące warunków brzegowych, w analizie MES uzyskano rozkłady naprężeń w kierunkach głównych σ_1 oraz σ_3 . Dla przypadku G (spienionego szkła bez dodatkowego ulepszenia struktury – rys. 6.6) uzyskano najwyższy poziom naprężeń głównych σ_1 spośród wszystkich analizowanych próbek. Na podstawie zaprezentowanych rozkładów naprężeń można stwierdzić znaczące różnice w poziomie naprężeń wewnątrz struktury. Zgodnie z zależnością (5.2) naprężenia na brzegu są wyższe niż w strefie wewnętrznej (oddalonej od brzegu). Z tego powodu wraz ze wzrostem obciążenia



Rys. 6.6. Rozkład naprężeń dla ściskanej próbki spienionego szkła – surowy kontakt próbki z podłożem (typ G)

dochodzi do inicjacji zniszczenia na krawędzi struktury, które propaguje do jej wnętrza aż do momentu całkowitego zniszczenia struktury. W przypadku próbki G, wykonanej z samego spienionego szkła, przyłożone obciążenie powoduje zginanie swobodnych krawędzi komórek (powstałych w wyniku cięcia dużego bloku spienionego szkła). Objawia się to wysokim poziomem naprężeń (rys. 6.6). Maksymalne naprężenia rozciągające w rejonie zewnętrznym wynoszą 19,0 MPa. W przypadku obszaru wewnętrznego maksymalne naprężenia rozciągające wynoszą 10,3 MPa. W przypadku próbki zanurzonej w żywicy (rys. 6.7) oraz porów wypełnionych mąką (rys. 6.8) przyłożone obciążenie rozkładała się znacznie bardziej równomiernie (bez wyraźnych pików w warstwie zewnętrznej – naprężenia niższe niż w strefie środkowej). W rejonie przyłożenia obciążenia maksymalne naprężenia rozciągające wynoszą około 1,0 dla typu R (rys. 6.7) i 7,0 MPa dla typu F (rys. 6.8). Maksymalne naprężenia rozciągające znajdują się poza strefą przyłożenia obciążenia i wynoszą 10,05 MPa dla typu R oraz 10,1 MPa dla typu F.

Wypełnienie porów zewnętrznych spienionego szkła powoduje bardziej równomierne wprowadzenie obciążenia do struktury. Widać to szczególnie dobrze w przypadku R (z żywicą, rys. 6.7), gdzie w strefie wprowadzenia obciążenia następuje redukcja wytężenia struktury, w przeciwieństwie do przypadku samego szkła (rys. 6.6). Skutkuje to wzrostem wytrzymałości. Dodatkowa sztywność w kierunku prostopadłym do kierunku obciążenia powoduje obniżenie



Rys. 6.7. Rozkład naprężeń dla próbki wzmacnianej na powierzchni żywicą (typ R)



Rys. 6.8. Rozkłady naprężeń dla ściskanej próbki spienionego szkła próbka z porami na powierzchni wypełnionymi mąką (typ F)

maksymalnych naprężeń rozciągających (najniższe spośród analizowanych próbek). Przeciwdziała to rozpychaniu się struktury, co jest szczególnie widoczne w wynikach uzyskanych z badań eksperymentalnych przeprowadzonych w celach kalibracyjnych (opisanych w rozdziale 5.2). Należy zaznaczyć, że efekt ten jest widziany zwłaszcza w późniejszym etapie niszczenia próbek typu F (z mąką). Zaprezentowany model numeryczny nie jest w stanie uchwyć tego zjawiska. Należałoby zastosować bardziej złożone modelowanie dla tego przypadku. Niemniej jednak uzyskane wyniki obliczeń numerycznych dobrze zgadzają się z początkowym zakresem w badaniu eksperymentalnym (rys. 5.20b). W początkowym etapie przebiegu sił podczas eksperymentu widać, że próbka typu R (z żywicą) oraz F (z mąką) radzą sobie lepiej niż w przypadku próbki typu G (samego szkła).

Tabela 6.1 zawiera wyznaczone współczynniki bezpieczeństwa dla analizowanych przypadków bazując na hipotezie Mohra oraz Rankine'a. Na ich podstawie można stwierdzić, że przypadek samego spienionego szkła (typ G) jest najbardziej wytężony. Według hipotezy Rankine'a osiągnął on limit swojej nośności, natomiast w przypadku hipotezy Mohra strukturze pozostaje niewielki zapas nośności. Przypadek szkła wzmocnionego żywicą (typ R) oraz porami wypełnionymi mąką (typ F) są podobnie wytężone. W obu przypadkach hipoteza Rankine'a daje bardziej zachowawczy wynik. Hipoteza Mohra prezentuje dla tych przypadków mniejszy poziom wytężenia w przeciwieństwie do hipotezy Rankine'a.

		Н	ipoteza Mohr	Hipoteza Rankine'a		
Тур	Rodzaj podparcia	σ ₁ [MPa]	σ_3 [MPa]	n _{Moh}	σ_1 [MPa]	n _{Rankin}
G	Samo szkło	19.0	-0.5	1.002	19.00	1.000
R	Żywica	10.0	-17.1	2.090	10.02	1.896
F	Mąka	10.1	-17.3	2.071	10.15	1.873

Tabela 6.1. Współczynnik bezpieczeństwa dla analizowanych metod podparcia

Na podstawie uzyskanych wyników analizy numerycznej bazując na naprężeniach σ_1 wyznaczono współczynniki koncentracji naprężeń dla strefy wewnętrznej i zewnętrznej dla różnych wersji podparcia. Współczynniki określone zostały na podstawie zewnętrznego ciśnienia działającego na próbki o wartości 0,31 MPa. Tabela 6.2 zawiera uzyskane współczynniki koncentracji naprężeń. Zauważyć można niewielkie różnice w współczynnikach koncentracji naprężeń wewnątrz struktury mogą one świadczyć, że przygotowany model był zbyt mały i dalej widoczne są zaburzenia wynikające z odziaływania brzegu.

Тур	Dodzoi nodnomio	Współczynnik koncentracji naprężeń					
	Rodzaj podpareta	Region zewnętrzny	Region wewnętrzny				
G	Samo szkło	61,3	33,2				
R	Żywica	3,2	32,4				
F	Mąka	22,6	32,6				

Tabela 6.2. Współczynnik koncentracji naprężeń dla strefy wewnętrznej i zewnętrznej dla różnych rodzajów podparcia spienionego szkła

6.1.3. Bezpieczeństwo struktury spienionego szkła z uwzględnieniem sposobów podparcia i ciśnienia gazu

Sprawdzeniu poddano również przypadki różnego sposobu prowadzenia siły z uwzględnieniem obecności gazu wewnątrz struktury. Rysunek 6.9 prezentuje otrzymane wyniki dla przypadku ściskania próbki typu G (samego szkła) z uwzględnieniem podciśnienia 0,89 bara. Rysunek 6.10 odpowiada przypadkowi próbki R (piany szklanej wzmacnianej żywicą z podciśnieniem). Natomiast przypadek F (porów wypełnionych mąką z uwzględnieniem podciśnienia) przedstawiono na rys. 6.11. Przypadek nadciśnienia (0,72 bara) przedstawiony jest na kolejnych trzech rysunkach: rys. 6.12 – samo szkło (G), rys. 6.13 – szkło wzmacniane żywicą (R), rys. 6.14 przypadek spienionego szkła z porami wypełnionymi mąką (F).



Rys. 6.9. Rozkład naprężeń dla ściskanej próbki spienionego szkła – surowy kontakt próbki z podłożem (typ G) z uwzględnieniem podciśnienia (0,89 bara) wewnątrz struktury



Rys. 6.10. Rozkład naprężeń dla ściskanej próbki spienionego szkła – próbka wzmacniana na powierzchni żywicą (typ R) z uwzględnieniem podciśnienia (0,89 bara) wewnątrz struktury



Rys. 6.11. Rozkład naprężeń dla ściskanej próbki spienionego szkła – próbka z porami zewnętrznymi wypełnionymi mąka (typ F) z uwzględnieniem podciśnienia (0,89 bara) wewnątrz struktury



Rys. 6.12. Rozkład naprężeń dla ściskanej próbki spienionego szkła – surowy kontakt próbki z podłożem (typ G) z uwzględnieniem nadciśnienia (0,72 bara) wewnątrz struktury



Rys. 6.13. Rozkład naprężeń dla ściskanej próbki spienionego szkła – próbka wzmacniana na powierzchni żywicą (typ R) z uwzględnieniem nadciśnienia (0,72 bara) wewnątrz struktury



Rys. 6.14. Rozkład naprężeń dla ściskanej próbki spienionego szkła – próbka z porami zewnętrznymi wypełnionymi mąką (typ F) z uwzględnieniem nadciśnienia (0,72 bara) wewnątrz struktury

Tabela 6.3 przedstawia zestawienie maksymalnych naprężeń uzyskanych w wyniku analiz numerycznych. Na ich podstawie zauważyć można, że ciśnienie wewnętrzne nie ma tak dużego wpływu na maksymalny poziom wytężenia struktury w przypadku G (samego szkła). Jego wpływ jest na poziomie 7–12%. Natomiast w przypadku próbki R (z żywicą) widać bardzo duży jego wpływ. Zarówno przypadek pod- jak i nadciśnienia generuje wzrost maksymalnych naprężeń, przy czym przypadek podciśnienia jest groźniejszy – wzrost maksymalnych naprężeń wynosi 72%. Związane jest to ze sposobem modelowania tego przypadku, które nie w pełni oddaje rzeczywistość. Organicznie swobody przemieszczenia powoduje brak koncentracji naprężeń na obciążonym brzegu. Najbardziej wytężone są ściany we wnętrzu struktury. Dołożenie ciśnienia powoduje pojawienie się dodatkowych efektów zgięciowych, które manifestują się jako efekt działania gazu. W przypadku F (z porami wypełnionymi mąką) charakter wpływu ciśnienia jest bardzo podobny do przypadku R (z żywicą), ale minimalnie mniej znaczący. Maksymalny wzrost naprężeń wynosi 71%. Dodatkowo tabeli 6.4 przedstawiono współczynniki bezpieczeństwa według hipotezy Mohra oraz Rankine'a dla przypadku nad- i podciśnienia gazu wewnątrz struktury. W przypadku G (samego szkła) zauważyć można następujący efekt: podciśnienie pogarsza nośność struktury, a nadciśnienie polepsza. W przypadku R (żywicy) oraz F (mąki) zarówno nad- jak i podciśnienie obniża zapas bezpieczeństwa.

Rodzaj	Maksymalne	naprężenia rozcią	Zmiana względem stanu bez ciśnienia		
podparcia	Bez ciśnienia Podciśnienie 0,89 bara		Nadciśnienie 0,72 bara	Podciśnienie 0,89 bara	Nadciśnienie 0,72 bara
G (samo szkło)	19.0	17.68	21.33	-7%	12%
R (żywica)	10.0	17.23	17.03	72%	70%
F (mąka)	10.1	17.33	16.71	71%	65%

Tabela 6.3 Zestawienie maksymalnych naprężeń rozciągających dla przeliczonych przypadków

Tabela 6.4. Zestawienie współczynników bezpieczeństwa według hipotezy Mohra i Rankine'a

			Hipote	za Mohra		Hipoteza Rankine'a		
Rodzaj podparcia	Тур	σ ₁ [MPa]	σ ₃ [MPa]	n _{Mohr}	Zmiana	σ ₁ [MPa]	n _{Rankin}	Zmiana
	brak gazu	19.0	-0.5	1.002	-	19.0	1.000	-
G (samo szkło)	podciśnienie	17.7	-0.3	1.076	7%	17.7	1.075	7%
)	nadciśnienie	21.3	-0.5	0.892	-12%	21.3	0.891	-12%
	brak gazu	10.0	-17.1	2.090	-	10.0	1.896	-
R (żywica)	podciśnienie	17.2	0.0	1.102	-90%	17.2	1.102	-72%
	nadciśnienie	17.0	0.1	1.115	-87%	17.0	1.115	-70%
	brak gazu	10.1	-17.3	2.071	-	10.2	1.872	-
F (mąka)	podciśnienie	17.3	0.0	1.096	-89%	17.3	1.096	-71%
	nadciśnienie	16.7	0.1	1.137	-82%	16.7	1.137	-65%

6.2. Zagadnienie nieustalonej wymiany ciepła oraz odporności struktury na szoki cieplne

Przedmiotem analizy prowadzonej w tym rozdziale jest wpływ efektów termicznych na wytrzymałość struktury piany. Istnieją trzy mechanizmy wymiany ciepła: konwekcja, radiacja oraz przewodzenie. Radiacyjna wymiana ciepła polega na promieniowaniu termicznym – każde ciało o temperaturze wyższej od zera absolutnego emituje kwanty energii w postaci fotonów. Oznacza to, że ten mechanizm wymiany ciepła nie wymaga ośrodka, polega on na pochłanianiu i emitowaniu (ewentualnie odbijaniu) wspominanych fotonów w postaci fal elektromagnetycznych. Wielkość tej wymiany zależy od właściwości powierzchni danego ciała. Definiuje się parametry takie jak refleksyjność (r), absorpcyjność (a) oraz przepuszczalność (p), konieczne do opisania danego ciała. Refleksyjność definiuje się jako stosunek pomiędzy strumieniem ciepła odbitego do strumienia padającego $\frac{\hat{Q}r}{\hat{Q}}$. Absorpcyjność wyraża udział strumienia ciepła absorbowanego do padającego $\frac{\hat{Q}a}{\hat{Q}}$. W podobny sposób definiuje się przepuszczalność jako ilość strumienia przepuszczanego przez dane ciało do padającego $\frac{\hat{Q}p}{\hat{Q}}$. Zachodzi zatem związek:

$$r + a + p = 1 \tag{6.5}$$

Na podstawie tej zależności można zdefiniować następujące rodzaje ciał:

- ciało doskonale czarne: a = 1,
- ciało białe: r = 1,
- ciało przezroczyste: p = 1,
- ciało nieprzezroczyste: p = 0,
- ciało szare: a < 1.

Ciało białe odbija całe promieniowanie jakie pada na jego powierzchnię. Ciało doskonale czarne pochłania całą energię, jaka dostarczana jest na jego powierzchnię w postaci promieniowania. W naturze dominująca większość ciał jest szara. Oznacza to, że zarówno pochłaniają jak również odbijają padające na ich powierzchnie fale elektromagnetyczne. Jeśli dla jakiegoś ciała uprzywilejowana jest jakaś konkretna długość fali w trakcie odbicia, ciało to ma barwę odpowiadającą światłu o tej samej długości fali. Ze względu na złożoność zjawiska w podjętych rozważaniach skupimy się na górnym oszacowaniu strumienia ciepła, jaki może zostać pochłonięty przez piankę. W tym celu posłużymy się modelem ciała doskonale czarnego, czyli takiego które pochłania całe ciepło dostarczane w postaci wiązki fotonów padających na jego powierzchnię. Strumień wymienianego ciepła opisuje równanie:

$$\frac{dQ}{dA} = \sigma_b (T_1^4 - T_2^4) \tag{6.6}$$

gdzie: Q – ciepło transportowane przez powierzchnię A, σ_b – stała Boltzmanna wynosząca 5,6644·10⁻⁸ W/m²K⁴, T₁ – temperatura pierwszej ścianki , T₂ – temperatura drugiej ścianki.

Ze względu na stosunkowo niską temperaturę operacyjną spienionego szkła wymiana ciepła poprzez radiację nie jest dominującym mechanizmem. Oszacowanie jego udziału zostanie przedstawione w kolejnym rozdziale. Wykluczając radiację, mechanizmami o największym znaczeniu będą: konwekcja i przewodzenie. Ciepło z płynu opływającego strukturę (ciecz albo gaz) za pośrednictwem konwekcji wnika do jej wnętrza. Zjawisko to opisuje równanie:

$$\frac{dQ}{dA} = U(T_s - T_f) \tag{6.7}$$

gdzie: Q – ciepło transportowane przez powierzchnię A, U – współczynnik wnikania ciepła, T_s – temperatura powierzchni opływanej, T_f – temperatura płynu.

Ciepło transportowane jest przez strukturę, a w przypadku takiego ciała jakim jest piana, ciepło może transferować się zarówno przez ścianki struktury jak i gaz uwięziony w jej wnętrzu. Ścianki transportują ciepło poprzez przewodzenie. W przypadku gazu, droga przepływu ciepła jest bardziej złożona ze względu na jego zamknięcie. Do gazu ciepło przenika ze ścianki, a następnie tym samym mechanizmem przekazywane jest dalej po drugiej stronie komórki do następnej ścianki. Ze względu na bardzo mały rozmiar komórek piany (na poziomie 1 mm) nie ma możliwości powstania ruchów konwekcyjnych. Dlatego przyjmuje się, że wewnątrz gazu ciepło również przekazywane będzie za pomocą przewodzenia. Współczynnik przewodzenia ciepła dla gazu obecnego wewnątrz struktury przyjęto jak dla powietrza równy 0,025W K⁻¹. Z godnie z rekomendacją [52] pominięto wpływ zmiany ciśnienia na współczynnik przewodzenia gazu. Zakładając duże podciśnienie wewnątrz struktury bliskie próżni, można by z góry zaniechać transportu ciepła przez gaz. Dla szkła współczynnik przewodzenia ciepła przyjęto zgodnie z tabelą 1.2. Na podstawie analiz numerycznych, które przedstawione są w kolejnym rozdziale, można stwierdzić, że udział gazu w wymianie ciepła jest pomijalny. W takim przypadku można założyć, że zmiana temperatury T wewnątrz w czasie t opisana jest prawem Fouriera

$$\nabla^2 T - \frac{c \,\rho}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \tag{6.8}$$

gdzie:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

oraz: λ – przewodność cieplna, *c* – ciepło właściwe, ρ – gęstość.

W trakcie nagrzewania się struktury dochodzi do zmiany wymiarów liniowych. Poniższe równanie opisuje zależność zmiany wymiarów liniowych wraz ze zmianą temperatury:

$$L = L_0 (1 + \alpha \Delta T) \tag{6.9}$$

gdzie: L_0 – początkowy wymiar liniowy, L – wymiar liniowy po ogrzaniu ciała o temperaturę ΔT , α – liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej.

W wyniku nierównomiernego nagrzewania się wnętrza struktury dochodzi również do nierównomiernego jej odkształcenia. Powoduje to powstawanie naprężeń, które mogą być wyznaczone z prawa Hooke'a. Dla jednowymiarowego przypadku bez możliwości wydłużeń przyjmuje ono postać:

$$\sigma_T = E\alpha\Delta T \tag{6.10}$$

W rozdziale 6.1.1 wstępnie opisano wpływ ciśnienia zamkniętego wewnątrz struktury. Zasygnalizowano tam, że jego efekt ma głównie znaczenie w przypadku komórek zlokalizowanych na brzegu. Spowodowane jest to brakiem równowagi ciśnienia pomiędzy dwiema stronami ścianki. Jednak podobny efekt, jak dla komórek zewnętrznych, można uzyskać podczas nierównomiernego nagrzewania się struktury, w którym do naprężeń od nierównomierności pola temperatury dochodzą naprężenia wynikające ze zmian ciśnienia między komórkami. Spowodowane jest to zatraceniem równowagi ciśnień wewnątrz struktury. Znając zmianę temperatury gazu wewnątrz komórki możliwe jest wyznaczenie zmiany ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury. W tym celu można posłużyć się równaniem stanu gazu doskonałego (równanie Clapeyrona (4.1)):

Korzystając z równań (6.9) oraz (4.1) widać, że zmiana objętości jest proporcjonalna do zmiany temperatury. Przyjmując dla wizualizacji objętość komórki jako sześcian, zmianę objętości można wyrazić jako trzecią potęgę zmiany długości jej boku. Zakładając niewielkie odkształcenia (liniowe) układu można przyjąć, że zmiana objętości jest zmienną małego rzędu. Zakładając rozmiar komórki jako 1 mm przy zmianie temperatury o 330 stopni (z 20°C do 350°C) wymiar liniowy komórki wydłuży się o 0,002739 mm. Zatem zmiana objętości będzie wynosiła 0,82%. Oznacza to, że zmiana objętości ma pomijalny wpływ na zmianę temperatury. Można zatem założyć, że przemiana gazu wewnątrz komórek zachodzi w sposób izochoryczny, co wyraża równanie:

$$\frac{p}{T} = \frac{nR}{V} = \text{constans}$$
(6.11)

Przy znajomości ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury oraz zmiany temperatury, można wyznaczyć aktualne ciśnienie działające na ścianki komórki. Do obliczeń nieustalonej wymiany ciepła wykorzystano model zbudowany w oparciu o metodę elementów skończonych (rys. 4.11). Opis modelu dostępny jest w rozdziale 4.3. Gaz wewnątrz struktury zamodelowany został przy pomocy elementów bryłowych (SOLID70).

6.2.1. Analiza wpływu szoków cieplnych

Analizie podano wpływ szoków cieplnych na zachowanie się struktury. Rozważono dwa przypadki szoków cieplnych. Pierwszy przypadek odpowiadał zanurzeniu próbki piany we wrzącej wodzie, drugi natomiast w wrzącym oleju. Na powierzchni zewnętrznej struktury (górna powierzchnia modelu) założono warunek brzegowy typu Cauche'ego: temperaturę płynu oraz konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła. Rysunek 6.15 prezentuje schemat przyłożenia warunków brzegowych w analizie nieustalonej wymiany ciepła.



Rys. 6.15. Warunki brzegowe przyjęte w analizie nieustalonej wymiany ciepła: a) wrząca woda, b) wrzący olej

Tabela 6.5 przedstawia podsumowanie przyjętych warunków brzegowych dla rozważanych przypadków.

Przypadek	Wrząca woda	Wrzący olej
Temperatura płynu [°C]	100	350
Konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła [W (m ² K) ⁻¹]	3000	2000
Temperatura otoczenia [°C]	20	20

Tabela 6.5. Warunki brzegowe w analizie nieustalonej wymiany ciepła

Na podstawie wzoru (6.6) można dokonać górnego oszacowania strumienia ciepła przejmowanego na drodze radiacji przy założeniu modelu ciała doskonalone czarnego. W przypadku wody będzie on wynosił 678,98 W m⁻², a dla oleju strumień ten wynosi 8 115,62 W m⁻². Zakładając ściankę o kształcie sześciokąta foremnego o boku długości 0,353 mm w ciągu jednej sekundy na drodze radiacji wymienione zostanie 0,003 J ciepła w przypadku oleju oraz 0,0002 J w przypadku wrzącej wody. Aby oszacować strumień ciepła transportowany poprzez przewodzenie dla uproszczenia założono, że komórka ma kształt graniastosłupa (o podstawie sześciokąta foremnego) o wysokości równej rozmiarowi komórki (1 mm) oraz średniej grubość ścianki 0,14 mm. Strumień ciepła może zostać oszacowany według wzoru

$$Q = \lambda \cdot A \frac{(T_1 - T_2)}{t} \tag{6.12}$$

gdzie: Q – ciepło transportowane przez powierzchnię ścianek bocznych A poprzez przewodzenie, T_1 – temperatura pierwszej ścianki , T_2 – temperatura drugiej ścianki , t – długość drogi przewodzenia ciepła, λ – przewodność cieplna.

W przypadku wrzącego oleju w ciągu jednej sekundy przetransportowane zostanie 0,09 J ciepła przez ściankę. Dla wrzącej wody ciepło to będzie równe 0,02 J. Oznacza to, że zakładając model ciała doskonale czarnego ciepło przenoszone na drodze radiacji stanowi jedynie 3% ciepła transportowanego na doradzę przewodzenia. W przypadku wrzącej wody udział ten wyniesie jedynie 1% Zważywszy niewielki udział ciepła wymienianego na drodze radiacji ten mechanizm wymiany ciepła zostanie wykluczony z dalszej analizy dla uproszczenia modelu. Zgodnie z rys. 6.15 rozważono dwa przypadki szoków cieplnych: zanurzenia w wrzącej wodzie oraz w wrzącym oleju. Dla obu przypadków analizę przeprowadzono z uwzględnieniem (zakładając ciśnienie gazu równe ciśnieniu otoczenia) albo pomięciem wpływu przewodzenia ciepła przez gaz obecny wewnątrz struktury. Z górnej powierzchni próbki wybrano węzeł i sprawdzono, jak zmienia się w nim temperatura w funkcji czasu. Rysunek 6.16 przedstawia zmianę temperatury dla przypadku z wodą, natomiast rys. 6.17 dla przypadku z olejem. Zauważyć można niewielką różnicę pomiędzy przypadkami analizy uwzględniającej i pomijającej efekt gazu.



Rys. 6.16. Zmiana temperatury na górnej powierzchni próbki spienionego szła w funkcji temperatury – przypadek zanurzenia w wrzącej wodzie



Rys. 6.17. Zmiana temperatury na górnej powierzchni próbki spienionego szła w funkcji temperatury – przypadek zanurzenia w wrzącym oleju

Tabela 6.6 przedstawia dane, na podstawie których zostały przygotowane wykresy z rys. 6.16 oraz rys. 6.17. Na jej podstawie można stwierdzić, że maksymalny błąd pomiędzy analizą uwzględniającą i pomijającą udział gazu w wymianie ciepła wynosi 6,48% (odpowiada to różnicy w temperaturze wynoszącej 2,32°C). Z tego powodu można z dobrym przybliżeniem pominąć komponent ciepła przenoszonego przez gaz obecny wewnątrz struktury. Na rys. 6.18 przedstawiono zmiany temperatury górnej powierzchni próbki dla obu przypadków: próbki zanurzonej w wrzącej wodzie oraz w wrzącym oleju, pomijając udział wymiany ciepła poprzez gaz. Na jego podstawie można stwierdzić, że próbka zanurzona w oleju nagrzewa się dużo szybciej. Świadczy o tym znacznie większy kąt nachylenia krzywej.



Rys. 6.18. Porównanie przebiegów zmiany temperatury górnej powierzchni próbki spienionego szkła w czasie dla przypadku wody i oleju

		We	oda		Olej			
Czas [s]	T [°C] z gazem	T [°C] bez gazu	ΔT [°C]	ΔΤ [%]	T [°C] z gazem	T [°C] bez gazu	ΔT [°C]	ΔΤ [%]
0,5	20,00	20,00	0,00	0,00%	20,00	20,00	0,00	-0,01%
1	20,01	20,01	0,00	0,01%	20,01	20,02	-0,01	-0,07%
1,5	20,03	20,02	0,00	0,02%	20,03	20,09	-0,05	-0,25%
2	20,07	20,06	0,01	0,06%	20,11	20,24	-0,13	-0,64%
3	20,37	20,32	0,05	0,26%	20,78	21,27	-0,49	-2,31%
4	20,94	20,82	0,12	0,56%	22,32	23,30	-0,99	-4,23%
5	21,79	21,60	0,20	0,92%	24,93	26,44	-1,51	-5,71%
6	22,93	22,63	0,29	1,30%	28,67	30,64	-1,97	-6,43%
7	24,29	23,90	0,40	1,65%	33,46	35,78	-2,32	-6,48%
8	25,85	25,35	0,50	1,96%	39,17	41,70	-2,54	-6,08%
9	27,55	26,95	0,59	2,21%	45,60	48,23	-2,63	-5,45%
10	29,35	28,66	0,69	2,40%	52,59	55,20	-2,61	-4,73%
20	46,05	44,95	1,11	2,46%	121,38	122,02	-0,64	-0,52%
30	59,37	58,13	1,24	2,13%	177,20	176,27	0,93	0,53%
40	69,54	68,31	1,23	1,80%	220,12	218,26	1,86	0,85%
50	77,19	76,05	1,14	1,50%	252,56	250,27	2,29	0,91%
60	82,93	81,92	1,02	1,24%	276,94	274,55	2,39	0,87%
70	87,23	86,34	0,89	1,03%	295,23	292,92	2,31	0,79%
80	90,45	89,69	0,76	0,85%	308,94	306,82	2,12	0,69%
90	92,85	92,22	0,64	0,69%	319,22	317,34	1,88	0,59%
100	94,65	94,12	0,53	0,57%	326,93	325,30	1,63	0,50%
120	96,81	96,44	0,37	0,38%	336,17	334,97	1,20	0,36%
140	98,09	97,84	0,25	0,26%	341,71	340,86	0,85	0,25%
160	98,86	98,69	0,17	0,17%	345,03	344,44	0,59	0,17%
180	99,32	99,20	0,11	0,11%	347,02	346,62	0,40	0,12%
200	99,59	99,52	0,07	0,08%	348,21	347,94	0,27	0,08%

Tabela 6.6. Zestawienie zmiany temperatury górnej powierzchni próbki spienionego szkła w analizie nieustalonej wymiany ciepła

Rysunek 6.19 przedstawia rozkłady temperatury dla całej próbki w wybranych punktach czasowych. Na ich podstawie można stwierdzić, że brzeg bardzo szybko ulega ogrzaniu w porównaniu do pozostałej części struktury. Wewnętrzna część ogrzewa się znacznie wolnej.

Fala ciepła potrzebuje czasu by wniknać w strukture piany. Jak już wspominano, próbka zanurzona w oleju nagrzewa się dużo szybciej. Wynika to ze znacznie większej różnicy temperatur pomiędzy płynem a badaną próbką. Pomimo wyższego współczynnika wnikania ciepła dla wody, wymiana ciepła z zastosowaniem oleju zachodzi dużo intensywniej. Dla lepszego zobrazowania zjawiska wybrano jedną komórkę z wnętrza struktury tuż pod powierzchnią, ze względu na to, że w tym obszarze najlepiej widoczny będzie wpływ gradientu temperatury. Dla tej komórki sprawdzono różnicę temperatur w trakcie procesu nagrzewania pomiędzy przeciwległymi ściankami leżącymi na drodze ciepła. Rysunek 6.20 prezentuje otrzymaną zmianę różnicy temperatury pomiędzy górną i dolną powierzchnią komórki. Widać pewne podobieństwa w charakterze obu przypadków. W obu przypadkach na początku procesu widać znaczącą różnicę pomiędzy temperaturami. W obu przypadkach maksimum przypada na 3 sekundę. Następnie temperatury pomiędzy powierzchniami się wyrównują. Różnica temperatur daży do zera. Tabela 6.7 przedstawia podsumowanie różnicy temperatur dla obu przypadków obliczeniowych. W przypadku próbki zanurzonej w oleju proces zachodzi bardziej dynamicznie. Widać znacząco wyższe różnice temperatur pomiędzy powierzchniami w porównaniu do wody. W punkcie kulminacyjnym różnica ta jest czterokrotnie wyższa.

Na podstawie przedstawionych danych można stwierdzić, że w wyniku szoków cieplnych wewnątrz struktury może dochodzić do znacznej różnicy temperatur pomiędzy komórkami. Dlatego postanowiono zbadać jak szoki te mogą wpłynąć na wytrzymałość struktury. Z jednej strony różnica temperatur powoduje nierównomierne rozszerzanie się struktury, a z drugiej strony może powodować nierównomierną zmianę ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury, powodując dodatkowe jej wytężenie. By zbadać ten wpływ posłużono się uzyskanym rozwiązaniem nieustalonej wymiany ciepła. Dla wcześniej wybranej komórki największą różnicę temperatur między górną i dolną powierzchnią zanotowano w 3 sekundzie nagrzewania dla próbki zanurzonej w oleju. Dla tego punktu czasowego odczytano temperaturę dla wszystkich węzłów przynależnych do tej komórki oraz węzłów komórek ją otaczających (rys. 6.21). Bazując na tych danych wyznaczono średnią temperaturę dla każdej komórki. Założono tu dla uproszczenia, że temperatura gazu będzie tożsama ze średnią temperaturą wewnątrz komórki.



Rys. 6.19. Rozkłady temperatury dla analizy nieustalonej wymiany ciepła wewnątrz struktury piany [°C] w wybranych punktach czasowych



Rys. 6.20. Zmiana różnicy temperatury pomiędzy górną i dolną powierzchnią w czasie, wewnątrz komórki zlokalizowanej tuż pod powierzchnią

Czas [s]	ΔT dla wody [°C]	ΔT dla oleju [°C]
0,5	10,3	40,7
1,0	19,3	77,3
1,5	24,7	99,5
2,0	27,4	110,8
3,0	28,5	115,8
4,0	28,0	114,2
5,0	27,0	110,4
6,0	25,9	106,0
7,0	24,8	101,6
8,0	23,8	97,4
9,0	22,8	93,5
10,0	21,9	89,9

Tabela 6.7. Różnica temperatur pomiędzy górną i dolną powierzchnią w czasie, wewnątrz komórki zlokalizowanej tuż pod powierzchnią

Korzystając z równania (6.11) wyznaczono nowe ciśnienia gazu aktualnie działające wewnątrz każdej komórki. Na podstawie badań opisanych w rozdziale 5.3 rozważono dwa skrajne przypadki możliwego ciśnienia wewnątrz komórek: 0,11 bara oraz 1,72 bara (ciśnienia absolutne). Ze względu na proces formowania się piany założono, że w temperaturze pokojowej nie ma różnic ciśnień pomiędzy komórkami. Po wyznaczeniu nowych ciśnień wewnątrz, przyłożono je jako obciążenie zewnętrzne do wyselekcjonowanej wcześniej komórki. Rysunek 6.22 przedstawia rozkład przyłożonych ciśnień do analizowanej komórki. Rysunek 6.23 natomiast prezentuje rozkład temperatur wewnątrz komórki.



Rys. 6.21. Grupa komórek wybrana do zbadania wpływu zmiany ciśnienia w wyniku podgrzewania na wytrzymałość struktury



Rys. 6.22. Różnica ciśnień [MPa] wewnątrz komórki wynikająca z nierównomiernego rozgrzania struktury: a) przypadek podciśnienia 0,89 bara, b) nadciśnienia 0,72 bara



Rys. 6.23. Temperatura [°C] wewnątrz komórki w 3s od zanurzenia próbki w oleju

Uzyskany rozkład naprężeń głównych σ_1 oraz σ_3 dla przypadku podciśnienia przedstawione zostały na rys. 6.24 oraz rys. 6.25. Rysunek 6.26 i rys. 6.27 prezentują wyniki dla przypadku nadciśnienia. Widać, że maksymalne naprężenia σ_1 nie przekraczają 0,3 MPa.



Rys. 6.24. Rozkład naprężeń głównych σ_1 [MPa] wewnątrz komórki w wyniku działania różnicy ciśnień wynikających z różnicy temperatur, przypadek podciśnienia (0,89 bara): a) powierzchnia zewnętrzna, b) powierzchnia wewnętrzna



Rys. 6.25. Rozkład naprężeń głównych σ_3 [MPa] wewnątrz komórki w wyniku działania różnicy ciśnień wynikających z różnicy temperatur, przypadek podciśnienia (0,89 bara): a) powierzchnia zewnętrzna, b) powierzchnia wewnętrzna

Na rys. 6.28 przedstawiono natomiast naprężenia główne σ_1 wytworzone w wyniku nierównomiernego rozszerzania się struktury. Maksymalne naprężenia sięgają 9 MPa. Natomiast naprężenia σ_3 dla tego przypadku nie przekraczają -11 MPa (rys. 6.29). Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzić można, że w przypadku wnętrza struktury efekt zmian ciśnienia na stopień wytężenia struktury nie przekracza 3,5%. Dominujący wpływ mają zagadnienia związane z rozszerzalnością temperaturową. W przypadku rozpatrywania tylko



Rys. 6.26. Rozkład naprężeń głównych σ_1 [MPa] wewnątrz komórki w wyniku działania różnicy ciśnień wynikających z różnicy temperatur, przypadek nadciśnienia (0,72 bara): a) powierzchnia zewnętrzna, b) powierzchnia wewnętrzna



Rys. 6.27. Rozkład naprężeń głównych σ_3 [MPa] wewnątrz komórki w wyniku działania różnicy ciśnień wynikających z różnicy temperatur, przypadek nadciśnienia (0,72 bara): a) powierzchnia zewnętrzna, b) powierzchnia wewnętrzna



Rys. 6.28. Rozkład naprężeń głównych σ₁ [MPa] wewnątrz komórki w przypadku nierównomiernego rozszerzania się komórki spowodowanego różnicą temperatur: a) powierzchnia zewnętrzna,
 b) powierzchnia wewnętrzna

tego efektu współczynnik bezpieczeństwa według hipotezy Rankine'a wynosi 2,1. Natomiast dla hipotezy Mohra współczynnik ten wynosi również 2,1 ($\sigma_1 = 9,06$ MPa, $\sigma_3 = 0,92$ MPa). Jak widać, rozpatrywany zakres gradientu temperatur nie spowodował uszkodzenia próbki spienionego szkła. W trackie badań eksperymentalnych, próbka spienionego szkła była zanurzona we wrzącym oleju o temperaturze 350 °C. W trakcie próby widać było pęcherze gazu wydobywające się z jego wnętrza. Świadczyło to o przerwaniu ciągłości struktury. Różnica w wynikach pomiędzy badaniami eksperymentalnymi i numerycznymi może wynikać z niedoszacowania współczynnika wnikania ciepła do struktury, większego rozrzutu własności wytrzymałościowych materiału bazowego lub pominięcia imperfekcji w strukturze spienionego szkła.



Rys. 6.29. Rozkład naprężeń głównych σ₃ [MPa] wewnątrz komórki w przypadku nierównomiernego rozszerzania się komórki spowodowanego różnicą temperatur: a) powierzchnia zewnętrzna,
b) powierzchnia wewnętrzna

6.2.2. Analiza wpływu ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury piany na jej wytrzymałość w trakcie pracy w podwyższonych temperaturach

Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych zaprezentowanych w rozdziale 6.2.1 można stwierdzić, że obecny wewnątrz struktury gaz ma niewielki wpływ na rozkład naprężeń wewnątrz struktury. Na podstawie badań opisanych w rozdziale 5.3 można stwierdzić, że wartość absolutnego ciśnienia wewnątrz struktury może zmienić się od 0,11 do 1,72 bara. Z tego powodu kolejnym zagadnieniem, które poddano analizie, był wpływ cieśnina gazu wewnątrz struktury na jej wytrzymałość w złożonych stanach obciążenia. Może okazać się, że samo podgrzanie gazu może spowodować wystarczająco dużą różnicę ciśnień, by doprowadzić do uszkodzenia struktury. W tym celu wykorzystano stworzony numeryczny model piany opisany w rozdziale 4.2. Rozważania rozdzielone zostały na dwa przypadki: zimny i gorący.

W pierwszym (zimnym) założono, że piana pracuje w temperaturze pokojowej (20°C). W drugim przypadku (gorącym) przyjęto równomiernie wygrzaną pianę do temperatury 250°C. Odpowiada to typowej temperaturze pracy dla spienionego szkła jako materiału izolacyjnego. Dla temperatury 20°C założono dwa przypadki ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury równe 0,11 oraz 1,72 bara. Z przekształconego równania stanu gazu doskonałego (6.11) wyznaczono zmianę ciśnienia, jaka nastąpi wewnątrz komórki w wyniku wzrostu temperatury - przy założeniu izochorycznego podgrzewania gazu. Nowe ciśnienia będą wynosić odpowiednio 0,20 oraz 3,07 bara. W obliczeniach numerycznych obie próbki obciążono przy pomocy wymuszenia kinematycznego. Wymuszenie kinematyczne dobrano tak, by dla obu temperatur uzyskać takie sam równoważny obciążenia struktury (0,31 MPa - limitujące obciążenie dla stanu ściskania według hipotezy Rankine'a- podobnie jak w rozdziale 6.1.2) stan bez uwzględnienia gazu. Różnice w wymuszeniach kinematycznych wynikają ze zmiany sztywności struktury, jakie zachodzą wraz ze wzrostem temperatury. Prace [12] i [13] opisują wpływ temperatury na wartość modułu Younga materiałów szklanych. Zgodnie z przedstawionymi danymi, wraz ze wzrostem temperatury materiał szkła staje się coraz bardziej elastyczny, co odzwierciedla spadek modułu Younga. Rysunek 6.30 prezentuje zależność modułu Younga od temperatury wg [13]. Tabela 1.2 podaje moduł Younga dla szkła równy 7,2 GPa w temperaturze pokojowej. Na podstawie rys. 6.30 w temperaturze 250°C moduł Younga został obniżony do wartości 6,8 GPa.



Rys. 6.30. Moduł Younga w funkcji temperatury dla szkła krzemowego [13]

Rysunek 6.31 przedstawia wyniki dla przypadku próby ściskania i rozciągania w temperaturze pokojowej bez uwzględnienia wpływu gazu (brak gazu). Rysunek 6.32 prezentuje



Rys. 6.31. Naprężenia główne σ_1 [MPa] dla próbki pracującej w temperaturze pokojowej bez uwzględnienia gazu wewnątrz struktury, ściskanie\rozciągnie wymuszeniem 0,31MPa

naprężenia główne σ_1 dla przypadku z podciśnieniem (-0,89 bara) w temperaturze pokojowej. Rysunek 6.33 przedstawia natomiast przypadek, gdy próbka z podciśnieniem zostanie podgrzana (-0,80 bara), a rys. 6.34 oraz rys. 6.35 odpowiadają stanowi nadciśnienia wewnątrz struktury odpowiednio w temperaturze pokojowej (0,72 bara) oraz podwyższonej (2.7 bara). W tabeli 6.8 zaprezentowano zestawienie maksymalnych naprężeń dla każdego przypadku. Na podstawie wyników w temperaturze pokojowej można stwierdzić, że gaz z podciśnieniem poprawia funkcjonowanie struktury przy ściskaniu (obniżając stan naprężenia), pogarszając ją w przypadku rozciągania. Odwrotnie jest w przypadku nadciśnienia. Gaz zwiększa maksymalne naprężenia w trakcie próby ściskania i redukuje je przy rozciąganiu. W przypadku podgrzania próbek największa różnice naprężeń widać w przypadku próbek, w których gaz ma ciśnienie wyższe od ciśnienia otoczenia. Dodatkowe zwiększenie ciśnienia gazu spowodowane ogrzaniem przekłada się na wzrost maksymalnych naprężeń zarówno w próbie ściskania (wzrost 121,2%) oraz rozciągania (wzrost 53,6%). W przypadku podciśnienia wzrost ciśnienia gazu wynikający z jego podgrzania nieznacznie przekłada się na wytężenie struktury (zmiana o 2,% w próbie ściskania oraz 4,6% w przypadku rozciągania). Przeprowadzone analizy pokazały ponownie, że stan nadciśnienia gazu wewnątrz struktury jest dla niej dużo groźniejszy. W trakcie produkcji należy tak utrzymywać parametry procesy by wykluczyć jego pojawienie.



Rys. 6.32. Naprężenia główne σ_1 [MPa] dla próbki pracującej w temperaturze pokojowej z uwzględnieniem podciśnienia gazu wewnątrz struktury (p = -0.89 bara), ściskanie\rozciągnie wymuszeniem 0,31MPa



Rys. 6.33. Naprężenia główne σ_1 [MPa] dla próbki pracującej w temperaturze 250°C z uwzględnieniem podciśnienia gazu wewnątrz struktury (p = -0.80 bara), ściskanie\rozciągnie wymuszeniem 0,31MPa



Rys. 6.34. Naprężenia główne σ_1 [MPa] dla próbki pracującej w temperaturze pokojowej z uwzględnieniem nadciśnienia gazu wewnątrz struktury (p = 0,72 bara), ściskanie\rozciągnie wymuszeniem 0,31MPa



Rys. 6.35. Naprężenia główne σ_1 [MPa] dla próbki pracującej w temperaturze 250°C z uwzględnieniem nadciśnienia gazu wewnątrz struktury (p = 2,07 bara), ściskanie\rozciągnie wymuszeniem 0,31MPa

	Ciśnienie gazu	Temperatura pokojowa $T = 20 ^{\circ}\mathrm{C}$		Podw temperati	yższona ara = 250 °C	Zmiana % 20 °C/250 °C	
	8-2	Ściskanie	Rozciąganie	Ściskanie	Rozciąganie	Ściskanie	Rozciąganie
	0,11 bar (podciśnienie)	17,68	37,89	18,15	39,65	2,7%	4,6%
	1,72 bar (nadciśnienie)	21,33	33,64	47,18	52,00	121,2%	54,6%
	Brak gazu	19,00	35,44				
Zmiana % z gazem /bez gazu	Podciśnienie	-6,9%	6,9%				
	Nadciśnienie	12,3%	-5,1%				

Tabela 6.8. Maksymalne naprężenia rozciągające w strukturze dla stanu ściskania i rozciągania w temperaturze pokojowej i podwyższonej z uwzględnieniem obecności gazu wewnątrz struktury

6.3. Obwiednia stanów niszczących dla struktury spienionego szkła

W rozdziale 3.6 opisane zostały hipotezy wytrzymałościowe. Podstawowym kryterium określającym stan, w którym dojdzie do zniszczenia ustroju dla materiałów kruchych jest hipoteza Mohra. W celu wyznaczenia obwiedni stanów bezpiecznych zazwyczaj wykonuje się dwie próby wytrzymałościowe: ściskania i rozciągania. Tabela 1.3 przedstawia maksymalne naprężenia rozciągające i ściskające dla szkła: 19 MPa dla rozciągania (z prawdopodobieństwem uszkodzenia 0,8%) oraz 338 MPa dla ściskania. Na ich podstawie można wykreślić obwiednię pokazaną na rys. 6.36. Wszystkie stany wytężenia znajdujące się wewnątrz klina wyznaczonego przez linie styczne do kół maksymalnych naprężeń są stanami bezpiecznymi. Struktura spienionego szkła w swojej budowie jest złożona. Zakładając uproszczony model struktury, bazujący na czternastościanie foremnym, i wycinając z niej elementarną "koskę" uzyskana zostanie struktura pokazana na rys. 6.37. Gdy poddamy ją prostemu ściskaniu i rozciąganiu wewnątrz struktury powstanie złożony stan wytężenia.

"Kostkę" z rys. 6.37 poddano ściskaniu i rozciąganiu na kierunku x oraz y. Rysunek 6.38 przedstawia uzyskane pole przemieszczeń kierunkowych (uy) dla ściskania na kierunku y wymuszeniem równym -4.9 MPa. Rysunek 6.39 prezentuje odpowiadające temu stanowi naprężenia na kierunku głównym σ_1 . Na podstawie rozwiązań dla stanu jednoosiowego obciążenia struktury (na kierunku x oraz y) stosując metodę superpozycji, wyznaczono składowe naprężeń głównych wewnątrz ustroju σ_1 oraz σ_3 dla złożonych stanów obciążenia.



Rys. 6.36. Obwiednia naprężeń niszczących według hipotezy Mohra dla szkła



Rys. 6.37. Elementarna "kostka" spienionego szkła: a) model poglądowy, b) model bazujący na czternastościanie foremnym

Posługując się wzorem (3.13) podstawie stanu naprężenia w każdym węźle na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej wybrana została krytyczna lokalizacja i wyznaczono graniczne stany naprężeń. Uzyskane dane podsumowano w tabeli 6.9. Na ich podstawie wykreślono
obwiednię stanów dopuszczalnych, przedstawioną na rys. 6.40. Rysunek 6.41 prezentuje krytyczne koło Mohra dla każdego rozważanego przypadku. Widać bardzo wyraźnie jak układają się one w klin przedstawiony na rys. 6.36.



Rys. 6.38. Elementarna "kostka" spienionego szkła podana ściskaniu (-4.9 MPa) wzdłuż osi y – przemieszczenia uy [mm]: a) kostka z nałożonym nieodkształconym modelem, b) widok izometryczny



Rys. 6.39. Elementarna "kostka" spienionego szkła poddana ściskaniu (-4.9 MPa) wzdłuż osi y – naprężenia główne σ₁ [MPa]:
a) powierzchnia zewnętrzna, b) powierzchnia wewnętrzna

dia złożenych stane w oberążenia (zb)			
Przypadek		G1	G 3
σ _x [MPa]	σ _y [MPa]	[MPa]	[MPa]
0,0	2,2	19,5	-8,9
1,0	2,1	19,4	-6,2
1,9	1,9	19,2	-3,6
2,1	1,0	19,4	-6,2
2,2	0,0	19,5	-8,9
1,8	-0,9	19,8	-13,9
1,5	-1,5	20,0	-17,4
1,2	-2,4	20,2	-21,8
0,0	-4,9	21,3	-40,0
-2,7	-5,4	20,3	-23,6
-4,1	-4,1	19,7	-13,0
-5,4	-2,7	20,3	-23,6
-4,9	0,0	21,3	-40,0
-2,4	1,2	20,2	-21,8
-1,5	1,5	20,0	-17,4
-0,9	1,8	19,8	-13,9

Tabela 6.9. Obwiednia krytycznych naprężeń dla struktury spienionego szkła dla złożonych stanów obciążenia (2D)



Rys. 6.40. Obwiednia naprężeń dopuszczalnych dla struktury spienionego szkła



Rys. 6.41. Zestawienie krytycznych kół Mohra dla rozważanych stanów obciążenia

W podobny sposób analizę można przeprowadzić dla trójwymiarowego obciążenia struktury. Najbardziej interesujące stany, z punktu widzenia analizy, to stan trójosiowego rozciągania oraz ściskania. Zgodnie z hipotezą Mohra (rozdział 3.6), posługując się wzorem (3.12), można wyznaczyć maksymalne hydrostatyczne ciśnienie, jakiemu może zostać poddane ciało przy rozciąganiu, by nie naruszyć jego ciągłości. W przypadku szkła, bazując na danych materiałowych przedstawionych w rozdziale 1, σ_M wynosi 112,9 MPa. W przypadku koski wyciętej z spienionego szkła wartość ta ogranicza się jedynie do 2,7 MPa. Natomiast dla ściskania limit wynosi 8,7 MPa. Tabela 6.10 zawiera naprężenia σ_1 oraz σ_3 definiujące limitujące koła Mohra. Należy tu podkreślić, że w rozważanych granicznych globalnych stanach obciążenia (hydrostatycznego ściskania oraz rozciągania) lokalnie wewnątrz struktury występuje złożenie dwóch stanów naprężeń: błonowego - stałego po grubości ścianki oraz zgięciowego - liniowo zmiennego w funkcji grubości ścianki. Dlatego pomimo przypadku ściskania wewnątrz struktury mogą pojawić się naprężenia rozciągające. Ze względu na dużą asymetrię właściwości wytrzymałościowych naprężenia rozciągające przyczyniają się do znacznego obniżenia maksymalnej nośności układu. Zgodnie z danymi przedstawionymi w tabeli 6.10 dla przypadku rozciągania udział naprężeń ściskających jest nieistotny. Z tego względu koincydencja z hipotezą Rankine'a jest oczywista (rozciąganie dopuszczone przez hipotezę Rankine'a 2,7MPa). W przypadku wszechstronnego ściskania sytuacja nie jest już tak prosta, ponieważ oprócz dużej wartości bezwzględnej ściskania w jednym z kierunków głównych występuje również niewielkie rozciąganie w drugim z kierunków głównych. W przypadku ściskania maksymalne ciśnienie hydrostatyczne jakie dopuszcza hipoteza Rankine'a to -8,0 MPa.

Obciążenie globalne	Lokalny stan naprężenia	
Przypadek	σ_1	σ ₃
$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$ [MPa]	[MPa]	[MPa]
2,7	19,01	-0,25
-8,7	20,53	-27,14

Tabela 6.10. Warunki graniczne dla wszechstronnego ściskania i rozciągania według hipotezy Mohra.

7. Podsumowanie

W pracy tej podjęto temat wytrzymałości spienionego szkła i zbadano wpływ budowy struktury porowatej na jej właściwości wytrzymałościowe. Na podstawie przeprowadzonych analiz wytrzymałościowych, potwierdzonych badaniami eksperymentalnymi, stwierdzono, że:

- Inicjacja zniszczenia spienionego szkła następuje na jego brzegu.
- Sposób wprowadzenia siły do wnętrza struktury ma kluczowy wpływ na jej nośność.
- Brzeg spienionego szkła powinien być zabezpieczony żywicą lub smołą w celu jego wzmocnienia, co w efekcie zwiększa nośność struktury.
- Przeprowadzone analizy poparte wynikami doświadczeń pokazały, że sypkie podłoże takie jak żwir lub mąka (użyta w eksperymencie) zmniejszają nośność spienionego szkła powodując rozsadzanie jego struktury.
- Wewnątrz spienionego szkła, podczas typowego procesu wytwarzania, powstają duże różnice ciśnienia pomiędzy poszczególnymi komórkami wewnątrz struktury, które dla warunków rozpatrywanych w niniejszej pracy zmieniały się od 0,89 bar podciśnienia do 0,72 bar nadciśnienia.
- Stan podciśnienia wewnątrz struktury jest znacznie korzystniejszy i bezpieczniejszy w porównaniu do nadciśnienia. Parametry technologiczne w trakcie procesu produkcji powinny być tak dobrane, by zapewnić ten stan.
- Analizy numeryczne MES pokazały, że w przypadku wyrównanego ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury, nagłe zmiany jego wielkości spowodowane szokami cieplnymi nie powinny spowodować uszkodzenia struktury spienionego szkła.
- Ciśnienie gazu zamkniętego wewnątrz komórek wpływa na zachowanie się struktury spienionego szkła przy jego brzegu: nadciśnienie powoduje zmniejszenie nośności struktury na ściskanie, a podciśnienie pogarsza nośność przy rozciąganiu.
- W przypadku gdy różnica pomiędzy ciśnieniem panującym w komórkach położonych w sąsiedztwie brzegu struktury, a ciśnieniem atmosferycznym jest duża, wahania temperatury mogą spowodować otwarcie komórek i pogorszenie właściwości izolacyjnych struktury.
- Duże gradienty temperatury mogą doprowadzić do uszkodzenia struktury w wyniku zjawiska rozszerzalności cieplnej, prowadzącego do rozerwania (zgniecenia) komórek wewnątrz struktury.
- Analiza stanów granicznych przeprowadzona na podstawie analiz MES dla spienionego szkła, w kierunkach złożonych stanach naprężeń, wykazała, że limitujące są lokalne wartości maksymalnych naprężeń głównych, ponieważ stan zgięciowy naprężeń w ściankach komórek jest wielokrotnie większy niż stan błonowy. Z tego względu, nawet w warunkach makroskopowego hydrostatycznego ściskania, lokalnie w strukturze komórkowej występuje duża rozbieżność naprężeń głównych. Wynika z tego istotne zmniejszenie asymetrii właściwości wytrzyma-

łościowych szkła komórkowego w odniesieniu do dużej asymetrii wytrzymałości materiału litego szkła.

- Kryterium lokalnej wytrzymałości Galileusza-Rankine`a i Mohra-Coulomba w przypadku czternastościennej struktury szklanej wskazują podobne wyniki, hipoteza Galileusza-Rankine`a jest bardziej zachowawcza.
- W warunkach równomiernego trójosiowego rozciągania kryterium Galileusza-Rankine'a jest zbieżne z kryterium Mohra i daje wartość rozciągania na poziomie 2.7 MPa, natomiast w warunkach hydrostatycznego ściskania występują pomiędzy nimi pewne różnice. Stosowalność tych kryteriów w stanie hydrostatycznego ściskania może być zweryfikowana na drodze próby ciśnieniowania pianki szklanej, przy czym wartość ciśnienia niszczącego pianę wynosi między 8-9 MPa.

Warto zaznaczyć, że w trakcie samego procesu formowania spienionego szkła może dochodzić do powstawania niedoskonałości takich jak: pofalowanie ścianek komórek, różnice ich grubości i rozmiaru, nierównomierny rozkład komórek. Przeprowadzone analizy, poparte badaniami eksperymentalnymi wykazały, że badanie materiałów porowatych, takich jakim jest spienione szkło, choć jest zagadnieniem trudnym ze względu na dużą liczbę zmiennych parametrów takich jak: właściwości materiałowe, niedoskonałości struktury wewnętrznej, duże wahania ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury, pozwala jednak uzyskać zadowalające wyniki i dostarcza cennych wskazówek pozwalających na optymalne wykorzystanie właściwości spienionego szkła.

W trakcie procesu produkcji na powierzchni szkła tworzy się utwardzona warstwa wierzchnia o podwyższonych parametrach wytrzymałościowych, nie pogarszająca właściwości izolacyjnych materiału (szkło samo ma niską przewodność cieplną). Aktualnie spienione szkło produkowane jest i wypiekane w formach, w postaci arkuszy, z których następnie wycinane są części składowe: moduły i docelowe fragmenty izolacji. Cięcie szkła powoduje naruszenie struktury materiału, w związku z czym wycięte elementy pozbawione są naturalnej warstwy brzegowej. W celu poprawy parametrów spienionego szkła zaleca się więc zmianę podejścia do procesu jego produkcji. Jedną z propozycji poprawy wytrzymałości jest wypiekanie gotowych elementów, by unikać procesu cięcia. Element wyjęty z formy byłby bezpośrednio instalowany w miejscu przeznaczenia konstrukcji. Owa warstwa wierzchnia zabezpieczałaby strukturę izolacji wzmacniając ją w podobny sposób jak utwardzona mieszanka sycaca w przypadku struktur kompozytowych. W przypadku zastosowania takiego rozwiązania, w trakcie procesu projektowania należałoby uwzględnić skurcz na skutek spadku temperatury elementu po zakończeniu procesu wypiekania. Aktualnie skurcz taki uwzględniany jest przy produkcji odlewów oraz niektórych kompozytów, dlatego implementacja tego rozwiązania nie byłaby kłopotliwa. Dodatkową korzyścią tego rozwiązania byłby brak dodatkowych odpadów zwiazanych z dopasowaniem piany do wymaganego kształtu. Skracałoby to też proces produkcji, poprzez wyeliminowanie procesów cięcia i szlifowania, choć wymagałoby osobnej formy dla każdego detalu.

Uzyskane w pracy wyniki analiz numerycznych MES potwierdziły założoną tezę, że modelowanie struktury porowatej za pomocą metody elementów skończonych, wspartych badaniami eksperymentalnymi, pozwoliło na określenie lokalizacji inicjacji zniszczenia i sformułowanie wytycznych odnośnie sposobu wprowadzania obciążeń w strukturę posiadającą wypełnienie w postaci spienionego szkła oraz umożliwiło zbadanie wpływu ciśnienia w komórkach wypełniacza na wytrzymałość struktury.

Przedstawione w pracy modele analityczne i numeryczne stanowią podstawę do dalszych prac badawczych, w których można by uwzględnić takie zjawiska jak naprężenia resztkowe powstałe w trakcie procesu produkcyjnego spienionego szkła. Można także podjąć próbę przeprowadzenia symulacji kruchego pękania struktury spienionego szkła oraz przeprowadzić analizę zjawiska skurczu spienionego szkła w czasie stygnięcia w formie aby uwzględnić odpowiednie poprawki przy jej wykonywaniu.

8. Bibliografia

- [1] Prehistoria [w:] Zintegrowana Platforma Edukacyjna, https://zpe.gov.pl/a/prehistoria/ D1A5eSSWK
- [2] R. Lakes. Foam structures with a negative Poisson's ratio. Science, 235(4792):1038–1040, 1987. http://doi.org/10.1126/science.235.4792.1038
- [3] I. Szczepaniak. Szkło spienione: zastosowanie i ceny [w:] ladnydom.pl, Kraków, pressland S.A. 08-07-2015, https://ladnydom.pl/budowa/1,106566,17687129,Szklo_spienione_zastosowanie_i_ ceny.html
- [4] I. Szczepaniak. Co to jest szkło spienione? [w:] ladnydom.pl, Kraków, pressland S.A. 31-03-2015, https://ladnydom.pl/budowa/1,108843,17686697,Co_to_jest_szklo_spienione_.html
- [5] E. Le Bourhis, *Glass: Mechanics and Technology*. Wiley, 2014.
- [6] S.M. Karazi, I.U. Ahad, K.Y. Benyounis. Laser micromachining for transparent material. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2017. https://doi.org/ 10.1016/B978-0-12-803581-8.04149-7
- [7] NSG-Group [w:] pilkington.com, 2019 r., https://www.pilkington.com/-/media/pilkington/sitecontent/usa/window-manufacturers/technical-bulletins/ats129propertiesofglass20130114.pdf
- [8] R.J. Charles. Static fatigue of glass II, Journal of Applied Physics, 29(11):1554–1560, 1958. https://doi.org/10.1063/1.1722992
- [9] J. Cimek. Wieloskładnikowe szkła krzemianowe z wysoką zawartością tlenków metali ciężkich do zastosowań fonicznych. Praca doktorska, Uniwersytet Warszawski, 2017. https://depotuw.ceon.pl/ handle/item/2585
- [10] Engineers NBC (2005) The complete book on glass and ceramics technology. Asian Pacific Business Press, New Delhi.
- [11] R. Hess. Material glass. Structural Engineering International, 14(2):76–79, 2004. https://doi.org/ 10.2749/101686604777964008
- [12] S. Spinner. *Elastic moduli of glasses at elevated temperatures by a dynamic method*. Journal of the American Ceramic Society, 39(3):113–118, 1956. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1956. tb15634.x
- [13] J. Matsuda. Studies on the Young's modulus of silicate glass as a function of temperature, The Review of Physical Chemistry of Japan, 30(1):9–24, 1960. https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/ dspace/bitstream/2433/46785/1/rpcjpnv30p009.pdf
- [14] Y. Wang, Q. Wang, G. Shao, H. Chen, J. Sun, L. He, K.M. Liew. Experimental study on critical breaking stress of float glass under elevated temperature. Materials and Design, 60:41–49, 2014. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.038

- [15] Owens Corning [w:] Foamglas.com, 2022 r. https://www.foamglas.com/-/media/project/ foamglas/public/shared/files/foamglas-b/foamglas-s3/pds/pds-foamglas-s3-int-en.pdf?la=en
- [16] J. Bai J, X. Yang, S. Xu, W. Jing, J. Yang. Preparation of foam glass from waste glass and fly ash. Materials Letters, 136:52–54, 2014. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.07.028
- [17] H. Guo, Y. Gong, S. Gao. Preparation of high strength foam glass-ceramics from waste cathode ray tube. Materials Letters 64(8):997–999, 2010. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.02.006
- [18] X. Chen, A. Lu, G. Qu. Preparation and characterization of foam ceramics from red mud and fly ash using sodium silicate as foaming agent. Ceramics International, 39(2):923–1929, 2013. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.08.042
- [19] Y. Attila, M. Güden, A. Taşdemirci. Foam glass processing using a polishing glass powder residue. Ceramics International, 39(5):5869–5877, 2013. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.12.104
- [20] N. Gupta, Kishore, E. Woldesenbet, S. Sankaran. Studies on compressive failure features in syntactic foam material. Journal of Materials Science, 36:4485–4491, 2001. https://doi.org/ 10.1023/A:1017986820603
- [21] M. Koopman, K. Chawla, K. Carlisle, G. Gladysz. *Microstructural failure modes in three-phase glass syntactic foams*. Journal of Materials Science, 41:4009–4014, 2006. https://doi.org/ 10.1007/s10853-006-7601-9
- [22] N. Gupta, E. Woldesenbet, Kishore. Compressive fracture features of syntactic foams-microscopic examination. Journal of Materials Science, 37:3199–3209, 2002. https://doi.org/10.1023/ A:1016166529841
- [23] Piana [w:] encyklopedia.pwn.pl, [online], Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/piana;3956544.html
- [24] J. Banhart. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science, 46(6):559–632, 2001. https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5
- [25] https://beeyes.pl/wp-content/uploads/2017/01/Fotolia_60909238_XS.jpg
- [26] https://www.madinter.com/media/catalog/product/cache/3e16d5878980230b026e40d93eb908f7/n /o/nomex_1.jpg
- [27] L. Gibson, M. Ashby Cellular Solids: Structure and Properties. Cambridge University Press, 1997. https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326
- [28] https://www.foamglas.com/-/media/project/foamglas/public/shared/files/certifications/b--common-certificates/epd-environmental-product-decl/epd-foamglas-f-en.pdf
- [29] K.E. Oczoś. Pianoaluminium- właściwości, wytwarzanie, zastosowanie. Mechanik, 83:309–317, 2010.

- [30] J. Pawlicki, E. Koza, P. Żurawski, M. Leonowicz. Mechanical properties of closed-cell Al foams based on tetrakaidecahedronal model of structure. International Conference Advanced Metallic Materials. Smolenice, Slovakia, 2003.
- [31] J. Skibinski, K. Cwieka, T. Kowalkowski, B. Wysocki, T. Wejrzanowski, K.J. Kurzydlowski. *The influence of pore size variation on the pressure drop in open-cell foams*. Materials & Design, 87:650–655, 2015. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.079
- [32] J.L. Grenestedt, Influence of wavy imperfections in cell walls on elastic stiffness of cellular solids. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 46(1):29–50. https://doi.org/10.1016/S0022-5096(97)00035-5
- [33] A.E. Simone, L.J. Gibson. The effects of cell face curvature and corrugations on the stiffness and strength of metallic foams. Acta Materialia, 46(11):3929–3935, 1998. https://doi.org/ 10.1016/S1359-6454(98)00072-X
- [34] J.L. Grenestedt, F. Bassinet. Influence of cell wall thickness variations on elastic stiffness of closed cell cellular solids. International Journal of Mechanical Sciences, 42(7):1327–1338, 2000. https://doi.org/10.1016/S0020-7403(99)00054-5
- [35] M.W.D. Van der Burg, V. Shulmeister, E.Van der Giessen, R. Marissen. On the linear elastic properties of regular and random open-cell foam models. Journal of Cellular Plastics 33(1):31–54, 1997. https://doi.org/10.1177/0021955X9703300103
- [36] J.L Grenestedt, K. Tanaka. Influence of cell shape variations on elastic stiffness of closed cell cellular solids. Scripta Materialia, 40(1):71–77, 1998. https://doi.org/10.1016/S1359-6462(98)00401-1
- [37] M.J. Silva, L.J. Gibson. The effects of non-periodic microstructure and defects on the compressive strength of two-dimensional cellular solids. International Journal of Mechanical Sciences, 39(5):549–563, 1997. https://doi.org/10.1016/S0020-7403(96)00065-3
- [38] Sir W. Thomson. On the division of space with minimum partitional area. Acta Mathematica, 11:121–134, 1887. https://doi.org/10.1007/BF02612322
- [39] D. Weaire, R. Phelan. A counter-example to Kelvin's conjecture on minimal surfaces. Philosophical Magazine Letters, 69(2):107–110, 1994. https://doi.org/10.1080/09500839408241577
- [40] R. Gabbrielli, A new counter-example to Kelvin's conjecture on minimal surfaces. Philosophical Magazine Letters, 89(8):483–491, 2009. https://doi.org/10.1080/09500830903022651
- [41] J. Pawlicki, A. Mościcki. *Mechanical properties of open cell structure based on tetrakaidecahedronal geometry*. Publikacja w przygotowaniu.
- [42] M. Doroszko, A. Seweryn. Modelowanie odkształcania metalicznych materiałów porowatych z użyciem mikrotomografii komputerowej za pomocą MES. XIV Konferencja Nukowo-Technicza Techniki Komputerowe w Inżynierii, 2016. https://tki.wat.edu.pl/2016/streszczenia_TKI_pdf/ 096_Seweryn.pdf

- [43] T. Wejrzanowski, S.H. Ibrahim, J. Skibinski, K. Cwieka, K.J. Kurzydlowski. Appropriate models for simulating open-porous materials Image Analysis and Stereology, 36(2):105–110, 2017. https://doi.org/10.5566/ias.1649
- [44] K.H. Huebner, D.L. Dewhirst, D.E. Smith, T.G. Byrom. *The Finite Element Method for Engineers*. Wiley, 2001.
- [45] O.C. Zienkiewicz, R.L.. Taylor, J.Z. Zhu. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Butterworth-Heinemann, 2013.
- [46] D.G. Pavlou Essentials of the Finite Element Method. For Mechanical and Structural Engineers, Academic Press, 2015. https://doi.org/10.1016/C2014-0-03143-7
- [47] P. Borkowski, G. Krzesiński, P. Marek, T. Zagrajek. Metoda Elementów Skończonych w Mechanice Materiałów i Konstrukcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2022.
- [48] Ansys 19.2 Help
- [49] M.A. Sutton, W.J. Wolters, W.H. Peters, W.F. Ranson, S.R. McNeill. Determination of displacements using an improved digital correlation method. Image and Vision Computing, 1(3):133–139, 1983. https://doi.org/10.1016/0262-8856(83)90064-1
- [50] Z.L. Kahn-Jetter, T.C. Chu. Three-dimensional displacement measurements using digital image correlation and photogrammic analysis. Experimental Mechanics, 30(1):10–16, 1990. https://doi.org/ 10.1007/BF02322695
- [51] K. Suprynowicz. Opracowanie optycznej metody wyznaczania pola odkształceń próbek pierścieniowych i jej wykorzystanie do badań właściwości mechanicznych tętnic. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2018.
- [52] K. Badyda. Skorygowany wzór Sutherlanda do obliczeń przewodności cieplnej gazów, Biuletyn Instytutu Techniki Cieplnej, 85:45–54, 1997.