



Informacja Techniczna

Pękanie szkła spowodowane naprężeniami mechanicznymi

Szkło stanowi niezwykle istotny element naszego codziennego życia. Z reguły jednak przekonujemy się o tym gdy wypadnie nam z rąk butelka wyśmienitego czerwonego wina albo gdy widok przez okno zostaje zmaćcony pęknięciem na szybie. Rozbita na drobne kawałki szyba nie będzie już nas chronić przed złą pogodą czy nieproszonymi gośćmi. Nie stanowi już zapory przed ucieczką ciepła a w niektórych przypadkach może stać się przyczyną zranienia.

Materiałoznawstwo szkła

Materiałoznawstwo jest dziedziną wiedzy inżynierskiej, zajmującej się między innymi opisem mechanicznych cech materiałów poddawanych różnego rodzaju obciążeniom. Wiele z używanych do tego opisów pojęć pochodzi z naszego życia codziennego.

W celu niezależnej oceny parametrów geometrycznych materiałów, siły na nie działające odniesiono w stosunku do jednostek powierzchni. Siła, która działa na ciało na danej jednostce powierzchni, jest tak zwanym naprężeniem mechanicznym. W takim przypadku jednostka fizyczna jest taka sama jak dla ciśnienia: działająca siła odniesiona do powierzchni = $N/m^2 = Pa$ (Pascal) wzgl. $N/mm^2 = MPa$ (Megapascal). Wynikającym z obciążenia zewnętrznym napięciom określony materiał przeciwstawia swoją wytrzymałość. Jeśli więc działające teraz naprężenie mechaniczne przekroczy wytrzymałość przewidzianą dla danego materiału, to ulega on zniszczeniu. Wykonany w momencie zniszczenia pomiar, podczas którego badana próbka materiału była zginana lub ściskana, pokazuje maksymalną wartość jaką można obciążyć ten materiał. W zależności od kierunku działania obciążenia (rozciąganie, ściskanie, wyginanie, skręcanie) mogą wynikać z tego różne wartości wytrzymałości.

Objaśnienia istotnych dla materiałów pojęć i parametrów

Pojęcie	Jednostka	Opis
Wytrzymałość na zginanie	N/mm^2	Wartość maksymalnego naprężenia zginającego, które jest w stanie znieść dany materiał, zanim ulegnie pęknięciu.
Wytrzymałość na ściskanie	N/mm^2	Wartość naprężenia, pod wpływem którego materiał podczas zginatania ulega zniszczeniu.
Moduł E	N/mm^2	Moduł sprężystości opisuje związek pomiędzy naprężeniem a elastycznym odkształceniem. Jest miarą sztywności materiału.
Granica plastyczności	N/mm^2	Podaje wartość naprężenia przy którym zaczynają powstawać nieodwracalne odkształcenia plastyczne.
Odształcenie elastyczne	-	Po odjęciu działającego na materiał naprężenia powraca on do punktu wyjściowego.
Odształcenie plastyczne	-	Nieodwracalne odkształcenie materiału po przekroczeniu granicy plastyczności.



Materiały zachowują się w różny sposób pod wpływem działających naprężeń. Jeśli badany materiał po odjęciu działającego na niego obciążenia zginającego powraca bez zniszczeń do punktu wyjścia, mówimy wówczas, że było to odkształcenie „elastyczne”. Moduł sprężystości (Moduł E) opisuje stosunek naprężenia do wydłużenia materiału występującego w zakresie jego odkształceń elastycznych. Jeśli przykładowo dla gumy już niewielkie naprężenie prowadzi do dużego elastycznego odkształcenia, oznacza to że moduł E jest niewielki, materiał jest bardzo giętki, podatny na zmiany kształtu. Sztywne materiały, jak stal, posiadają bardzo wysoki moduł E.

- Moduł E dla szkła wynoszący 70.000 MPa znajduje się w obszarze bliskim aluminium.
- Szkło jest sztywne oraz bardzo dobrze odkształca się elastycznie.

Pojęcie „granica plastyczności” opisuje takie naprężenie, powyżej którego materiał pod wpływem sił zginających odkształca się w sposób nieodwracalny = „plastyczny” (np. guma do żucia). Jeśli granica odkształcenia plastycznego, a przez to wytrzymałości materiału na zginanie, zostaje przekroczona, następuje jego zniszczenie.

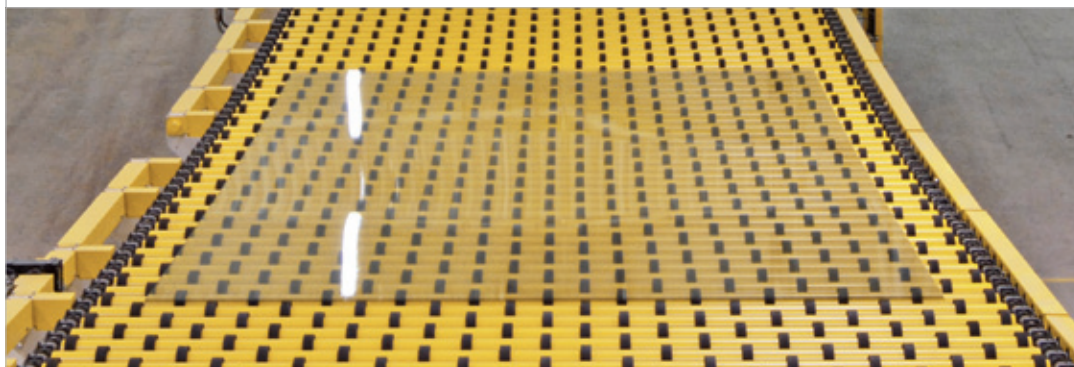
Materiał, który w niewielkim stopniu odkształca się plastycznie, określany jest jako materiał kruchy. Tak jak na przykład suche keksy, ceramika czy szkło. Przeciwnieństwem kruchości jest materiał ciągliwy. Taką cechę przypisuje się skórze, czy wielu metalom, które są szczególnie ciągliwe. Ciągłość opisuje wytrzymałość skierowaną przeciwko rozerwaniu materiału albo rozchodzeniu się pęknięcia.

Szkło jest wprawdzie elastyczne, ale bardzo kruche. Szkło pęka bez uprzedniego plastycznego przejścia (pęknięcie kruche). Dlatego szkło zawodzi nagle, bez jakiegokolwiek wcześniejszego ostrzeżenia.

Mechaniczne i termiczne cechy różnych rodzajów szkieł

Cecha	Jednostka	Szkło float	Szkło półhartowane (TVG)	Szkło hartowane (ESG)
Wytrzymałość na zginanie*	N/mm ²	45	70	120
Wytrzymałość na ściskanie	N/mm ²	700 – 900	700 – 900	700 – 900
Moduł sprężystości podłużnej	N/mm ²	ok. 70.000	ok. 70.000	ok. 70.000
Odporność na wstrząsy cieplne	K	40	100	150
Możliwość dalszej obróbki		Tak	Nie	Nie
Możliwość wystąpienia spontanicznego pęknięcia		Nie	Nie	Tak
Niebezpieczeństwo pęknięcia szkła		Wysokie	Niewielkie	Znikome
Opis siatki spękań		Radialne spękania powierzchniowe, duże kawałki szkła	Radialne spękania powierzchniowe, małe kawałki szkła	Spękania szkła w kształcie siatki, małe, tępe kawałki szkła

* W celu wymiarowania tafli szkła pod kątem określenia jej właściwości statycznych obowiązują każdorazowo dla danego zastosowania wartości zawarte w aktualnych normach!



Dlaczego szkło pęka ?

Wytrzymałość szkła nie jest określona jedynie przez budowę chemiczną i jego strukturę molekularną. Powstające podczas procesu produkcji szkła wewnętrzne napięcia oraz drobne defekty szkła, jak wszelkiego rodzaju zarysowania czy wtrącenia wpływają na ogólne obniżenie jego wytrzymałości.

Szkło posiada bardzo wysoką wytrzymałość na ściskanie zawierającą się w przedziale 700 – 900 N/mm². Odpowiada to mechanicznemu naprężeniu, które powstałoby, gdyby osoba ważąca ok. 70 – 90 kg stanęła na powierzchni wynoszącej jeden milimetr kwadratowy (inaczej mówiąc 7 – 9 ton na centymetrze kwadratowym).

Szkło jest bardzo wytrzymałe na obciążenia, które prowadzą do naprężeń ściskających, nie dotyczy to jednak obciążeń powodujących naprężenia zginające. Wytrzymałość szkła na zginanie wynosi zaledwie około jedną dziesiątą jego wytrzymałości na ściskanie.

Występowanie jedynie samych obciążeń ściskających w szkłe jest jednak w praktyce rzadkie. Każde ugięcie

szyby powoduje powstanie kombinacji obciążeń zginających i ściskających. Szkło zawsze pęknie gdy przyłożone do niego obciążenie przekroczy jego wytrzymałość na zginanie.

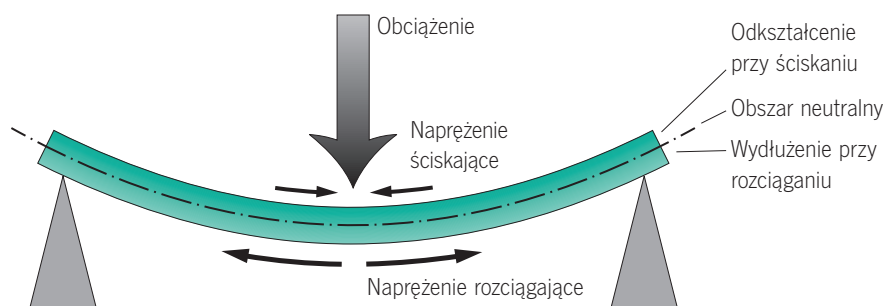
Szkło półhartowane (TVG) oraz szkło hartowane (ESG) mają znacznie wyższą wytrzymałość na zginanie w porównaniu ze zwykłym szkłem float. Wytrzymałość na obciążenia szkła laminowanego (VSG) zależy od rodzaju szkła z jakiego zostało ono wykonane. Jednak w przypadku rozbicia szyby VSG odłamki szkła pozostają przyklejone do powierzchni znajdującej się pomiędzy nimi folii. W przypadku szkła zbrojonego drutem, zatopiony w tafli drut osłabia jednorodny przekrój szkła oraz w wielorakich aspektach redukuje jego wytrzymałość.

Najsłabszym ogniwem tafli szkła pozostaje z reguły jej krawędź. Obórka szkła, jego cięcie i łamanie, powoduje powstawanie najczęściej właśnie na krawędziach wszelkiego rodzaju mikrodefektów. Jakość obróbki krawędzi jest zasadniczym elementem wpływającym na wytrzymałość na rozciąganie powstające przy zginaniu

szyby. Im gorsza jest jakość obróbki krawędzi, tym bardziej obniżona zostaje wytrzymałość samego szkła. Powstałe na krawędziach podczas cięcia odpryski szkła, nacięcia i drobne pęknięcia jak również uszkodzenia krawędzi podczas transportu, mogą drastycznie wpłynąć na obniżenie wytrzymałości szyby zespolonej. Dodatkowa obróbka krawędzi poprzez ich szlifowanie i polerowanie wpływa na poprawę wytrzymałości.

Samą łamliwość szkła z powodzeniem celowo wykorzystuje się podczas jego cięcia: poprzez zarysowanie za pomocą noża do cięcia szkła w kontrolowany sposób osłabia się powierzchnię szyby, aby następnie dzięki naprężeniu zginającemu złamać szybę wzdłuż zaznaczonej wcześniej linii.

! Zasadniczy wpływ na zwiększone ryzyko pęknięcia szyby ma wytrzymałość jej krawędzi na zginanie.



Podczas wyginania płyty szklanej jej górna powierzchnia jest ściskana (nacisk) zaś dolna jest wydłużana (rozciąganie).

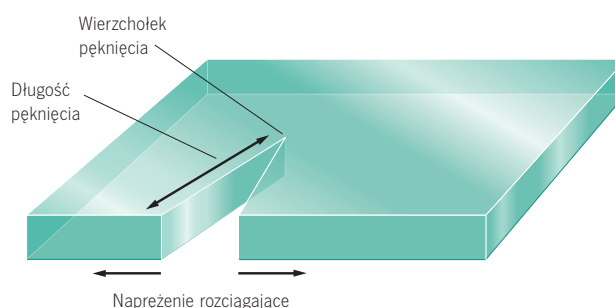
Mechanika pęknięcia

W materiale jednorodnym naprężenia rozciągające rozchodzą się jednakowo wzdłuż przekroju poprzecznego. Natomiast na nacięciach, rysach i wszelkiego rodzaju defektach szkła powstają skomplikowane struktury naprężeń, w których największe naprężenia przypadają na wierzchołki pęknięć. Przy doprowadzeniu odpowiednio wysokiego obciążenia mechanicznego lub termicznego pęknięcie na szkło będzie się sukcesywnie powiększać.

Wytrzymały materiał jest w stanie zredukować przyłożoną energię poprzez odpowiednio plastyczne odkształcenie na wierzchołku pęknięcia. W takim przypadku pęknięcie będzie się dalej rozszerzać tylko przy bardzo wysokim nakładzie energii. Szkło jednak jest materiałem, które nie posiada takich wewnętrznych „stref kontrolowanego zginania”. Generalnie jest materiałem kruchym, mającym bardzo niską odporność na pęknięcie.

Im dłuższe jest mikro pęknięcie na szkło, tym większe jest naprężenie na jego końcu i tym niższa jest wytrzymałość na zginanie. Krótko mówiąc: najdłuższa z rys określa wytrzymałość całości. Jeśli przyłożone obciążenie przekroczy krytyczną wartość naprężenia, dochodzi w szkło do nieustalonego wzrostu pęknięć.

W procesie pęknięcia każda rysa osiąga swoją maksymalną, charakterystyczną dla danego rodzaju szkła maksymalną prędkość pęknięcia. Powierzchnie spękań można dalej badać za pomocą analizy mikroskopowej. W ten sposób można rozpoznać wielkość naprężenia powodującego pęknięcie, określić wskazówki dotyczące miejsca, z którego wyszło pęknięcie czy wreszcie kierunek pęknięcia. Pęknięcia posiadające szczególnie wysokie naprężenia niszczące mogą się rozwarstwiać na granicy cieplej i zimnej powierzchni.



W wyniku działania naprężenia rozciągającego następuje stopniowe otwarcie rysy, a następnie po przekroczeniu pewnej wielkości krytycznej jej szybkie rozchodzenie się od strony wierzchołka.



Przyczyny pęknięcia szkła



Wszelkiego rodzaju odkształcenia powstające podczas transportu szyby, rozciąganie, wyginanie czy skręcanie są bezpośrednimi przyczynami powstawania w niej niekorzystnych naprężeń. Należy również pamiętać, iż bez ingerencji sił zewnętrznych mogą powstać w szybie naprężenia mechaniczne spowodowane zmianami temperatur. Szkło zawsze pęknie gdy występujące naprężenie przekroczy jego wytrzymałość na zginanie. Wytrzymałość szkła na zginanie nie zawsze jest

taka sama: wszelkiego rodzaju mikrodefekty czy uszkodzenia krawędzi szyby mogą drastycznie obniżyć jej wytrzymałość na zginanie.

Przyczyn pęknięcia szkła może być wiele. Nie wszystkie są od razu widoczne na szkłe jako pęknięcie. O tym czy szyba pękła na skutek obciążeń termicznych czy mechanicznych, można wykazać dopiero po przeprowadzeniu dokładnej analizy. W przypadku wystąpienia niejasności co do przyczyn należy wezwać eksperta, który na pod-

stawie przebiegu pęknięcia oraz formy i wielkości powstałych kawałków szkła, może ocenić jakie naprężenie wywołało uszkodzenie.

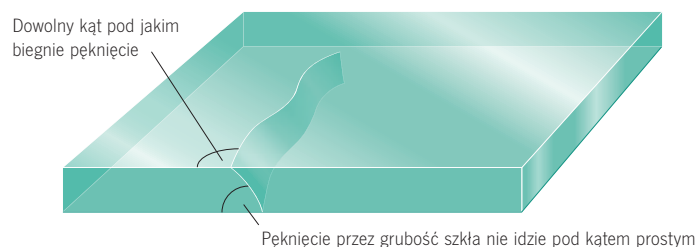
Należy w tym miejscu nadmienić, że często ustalenie miejsca, z którego wyszło pęknięcie czy kierunek pęknięcia wynika nie tylko z wiedzy eksperta, ale również z jego własnego doświadczenia. To zaś prowadzi do wyciągania właściwych wniosków.

Analiza pęknięć powstałych na szkłe jest niejednokrotnie utrudniona przez nakładające się na siebie kombinacje różnych czynników. Innym problemem dodatkowo utrudniającym sprawę analizy jest możliwość powstania opóźnienia czasowego pomiędzy przyczyną a wystąpieniem samego pęknięcia, na przykład gdy uszkodzona uderzeniem krawędź szyby wybrzusza się później pod wpływem czynników klimatycznych. Wysokie temperatury latem i/ lub zbyt niskie ciśnienie powietrza prowadzą do zwiększania objętości gazów zamkniętych w przestrzeni międzyszybowej. Ponieważ szkło jest elastyczne, szyba poddaje się powstającemu wewnętrznemu naprężeniu poprzez wybrzuszenie (robi się wypukła). Odwrotny przypadek, wygięcie szyby do środka (robi się wklęsła) następuje podczas niskich temperatur i wysokim ciśnieniu.

Ogólne zasady pęknięcia szkła

- pęknięcia rozchodzą się zawsze w jednym kierunku. Wracając wzdłuż rozwidleń z powrotem, dojdziemy do punktu wyjścia pęknięcia.
- jedno pęknięcie nie ma nigdy możliwości przejścia przez inne wcześniej już powstałe
- średnia liczba powstałych po pęknięciu kawałków szkła jest zależna od wielkości obciążenia przyłożonego w momencie powstawania pęknięcia.

Niemniej dopiero dokładne przeanalizowanie przebiegu pęknięcia a w szczególności źródła jego powstania pozwala jednoznacznie określić co było przyczyną uszkodzenia. Do stwierdzenia faktycznych przyczyn, które miały wpływ na pęknięcie szkła, konieczne jest ustalenie punktu, w którym to pęknięcie powstało.



Znaki charakterystyczne dla pęknięcia mechanicznego

(np. spowodowane przez naprężenie zginające)

- pęknięcie od krawędzi w głąb powierzchni szyby może przebiegać, ale nie musi, pod kątem prostym
 - pęknięcie przez grubość szyby nie idzie pod kątem prostym
- Pęknięcie powstałe podczas zginania szyby nie zawsze przebiega wzdłuż drogi najmniejszego oporu.

Przyczyny i przykłady mechanicznego pęknięcia szkła

Punkt czasowy	Rodzaj obciążenia	Przykłady
Podczas transportu	Punktowe obciążenie mechaniczne	- uderzenie krawędzi lub narożnika szyby podczas odstawiania na twardy grunt - bezpośrednie uderzenie krawędzi ciężkim przedmiotem - obracanie/przechylanie szyby na narożniku - nieprawidłowe odstawienie szyby na stojak - drobne kamyczki pomiędzy składowanymi szybami
	Powierzchniowe obciążenie mechaniczne	- przy zbyt wysokim różnicach wysokości pomiędzy miejscem produkcji szyby zespolonej a miejscem jej montażu bez zastosowania wyrównywania ciśnienia w przestrzeni międzyszybowej (obszary górskie)
Podczas montażu	Punktowe obciążenie mechaniczne	- złe wymiary klocków dystansowych - drobne kamienie lub odrobiny metalu pomiędzy krawędzią szyby a klockiem dystansowym - zbyt duży nacisk spowodowany listwą przyszybową przy połączeniu śrubami lub gwoździami - zbyt silne uderzenie młotkiem podczas montażu listwy przyszybowej - inne przyczyny spowodowane uderzeniami
	Odcinkowe obciążenie mechaniczne	- wyginanie szyby - skręcanie skrzydła okiennego
Szyby zamontowane	Powierzchniowe obciążenie mechaniczne	- zbyt duże różnice ciśnienia powietrza, temperatury i wysokości pomiędzy miejscem produkcji a miejscem montażu szyby - dla przeszkleń nad głową zbyt duże obciążenie długo zalegającym śniegiem - niedoszacowana budowa szyby przy zbyt wysokim obciążeniu wiatrem (przy nagłym wzroście prędkości wiatru)
	Odcinkowe obciążenie mechaniczne	- nieprawidłowe wymiary szyby w stosunku do ramy (nieuwzględnienie zmian długości) - źle dobrane grubości szyb - skręcanie się lub zakleszczanie skrzydła ramy okiennej - wszelkiego rodzaju ruchy okna przenoszone na szybę - zbyt wąska przestrzeń międzyszybowa dla znajdujących się w niej szprosów - nierównoległe, ale wklęsłe szyby ze szprosami
	Punktowe obciążenie mechaniczne	- ostrzał z broni - uderzenie kamieniem z procy - rzut kamieniem lub innym ciężkim/twardym przedmiotem w szybę - uderzenie młotkiem - uderzenie piłką - padający grad - zderzenie się lecącego ptaka z szybą - nacisk spowodowany przez człowieka - zbyt twarde elementy dystansowe na skrzyżowaniu szprosów - zetknięcie się konstrukcji lub przedmiotów podczas użytkowania (trzaśnięcie skrzydłem okna)