



Prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew KOWAL
Mgr inż. Anna TKACZYK, atkaczyk@tu.kielce.pl
Politechnika Świętokrzyska

USZKODZENIA W POSTACI LOKALNEJ UTRATY STATECZNOŚCI OKŁADZIN PŁYT WARSTWOWYCH Z OTWORAMI

A LOCAL FACE INSTABILITY AS AN EXAMPLE OF MATERIAL FAILURE IN SANDWICH PANELS WITH OPENINGS

Streszczenie W pracy przedstawiono przypadek uszkodzeń w postaci lokalnej utraty stateczności okładzin płyt warstwowych z rdzeniem styropianowym, zastosowanych do obudowy hali. Uszkodzenia, które miały miejsce w obszarze otworów i połączeń z ryglami przedstawiono na schemacie hali – rys. 1, 2, 4, 5, 6. Przeanalizowano przyczyny uszkodzeń i wyciągnięto wnioski dotyczące projektowania i montażu płyt warstwowych z otworami. Wskazano na kumulację wyężenia okładzin od obciążenia: wiatrem, temperaturą, skręcaniem i dociskiem łączników jako przyczynę lokalnej utraty stateczności okładzin. Wskazano konstrukcyjne możliwości dekumulacji wyężenia i unikania lokalnej utraty stateczności okładzin.

Abstract A sandwich panel system with a polystyrene foam core employed as an external wall cladding of a commercial and institutional building was analyzed for local face sheet instabilities. As can be seen from the diagrams in Figs. 1, 2, 4, 5 and 6, the wrinkling occurred in the connection areas and round window and door openings. The combined effect of wind action, temperature changes, torsional stress and pressure exerted by panel connectors was investigated for a system with openings. It was concluded that local face sheet instabilities and decumulation of effort can be avoided by proper design and construction.

1. Wprowadzenie

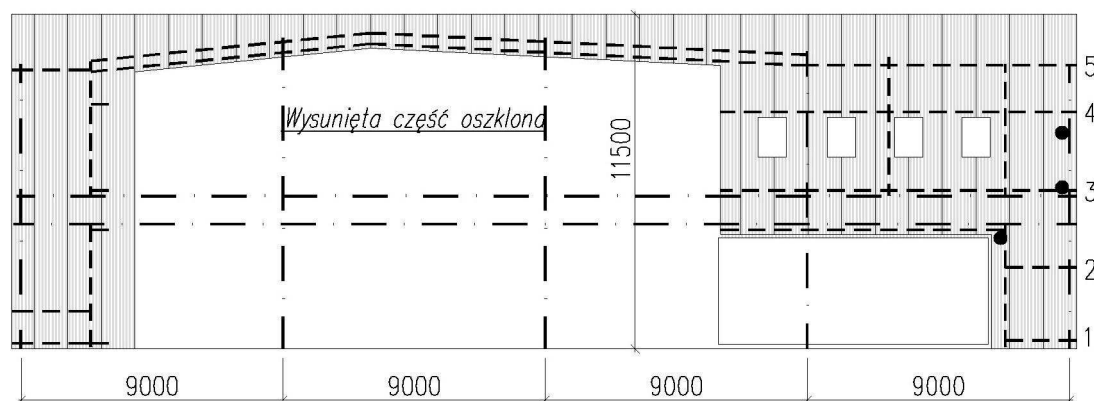
Przedmiotem pracy jest analiza uszkodzeń obudowy z płyt warstwowych o rdzeniu styropianowym występujących we wklęsłych narożach okładzin w obszarze otworów i połączeń. Uszkodzenia mają postać lokalnej utraty stateczności okładzin wywołanej obciążeniem, w tym przypadku, ssaniem wiatru i temperaturą. Nasilenie tych objawów wystąpiło na południowej elewacji obiektu, ale również na wschodniej i zachodniej. Miejsca wystąpienia uszkodzeń wskazują na istotny wpływ temperatury okładzin absorbujących promieniowanie słoneczne (zależne od koloru okładzin) na zaistniałe pofałdowanie okładzin.

Powszechnie stosowane płyty warstwowe jako lekka obudowa hal przemysłowych, budynków biurowych i hal handlowo – usługowych oraz wystawowych są obciążone wiatrem i temperaturą, a nieraz oblodzeniem i chronią obiekt przed czynnikami atmosferycznymi. Do obciążeń płyt warstwowych należy zaliczyć również niewłaściwie dociśnięte łącznikami do rygli ściennych płyty. Często w płytach warstwowych „wycina” się otwory drzwiowe i okienne na placu budowy. Producenci nakazują używać, w tym celu, specjalnego sprzętu do obróbki, który nie wytwarza wysokiej temperatury.

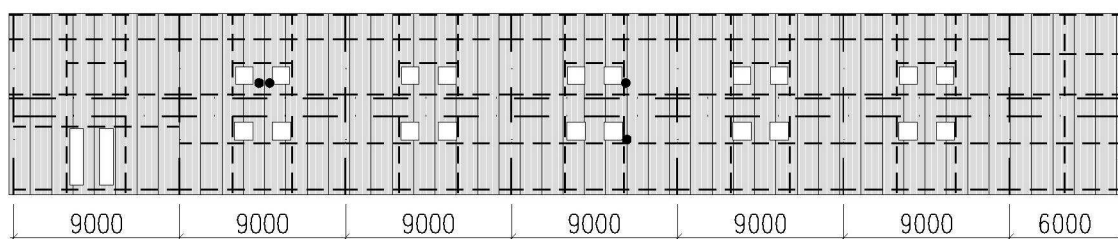
W analizowanych płytach wystąpiło kilka typów uszkodzeń, które można zaliczyć do lokalnej utraty stateczności okładzin. Uszkodzenia w obszarze wycięć otworów, gdzie nastąpiła koncentracja wyężenia okładziny na nie odciętej części płyty, oznaczono czarnymi punktami na rys. 1 i 2. Kolejna grupa uszkodzeń, w pobliżu łączników wzbudzona została dociskiem łączników podczas montażu poprzez za mocne ich dokręcenie. Przypadek ten pokazano na rys. 6 i oznaczono literą b. Ostatnią grupę uszkodzeń stanowi lokalna utrata stateczności okładzin w przęsłach pomiędzy ryglami podporowymi wywołana łącznym działaniem obciążenia termicznego i parcia wiatru. Ten typ nieestetycznych uszkodzeń okładzin zewnętrznych oznaczono literą c na rys.4.

2. Opis uszkodzeń płyt obudowy z otworami

Na rys. 1 i 2 pokazano schemat konstrukcji szkieletu ściany, na której doszło do uszkodzeń płyt warstwowych. Na rysunkach 1 i 2 oznaczono czarnymi punktami miejsca uszkodzeń okładziny płyt warstwowych w narożach przy otworach drzwiowych i okiennych oraz w miejscu łączników. Elementy zasadniczej konstrukcji nośnej zostały oznaczone czarną linią kreska-kropka. Ryglówkę, podpierającą płyty obudowy oznaczono czarną linią drobno przerywaną.



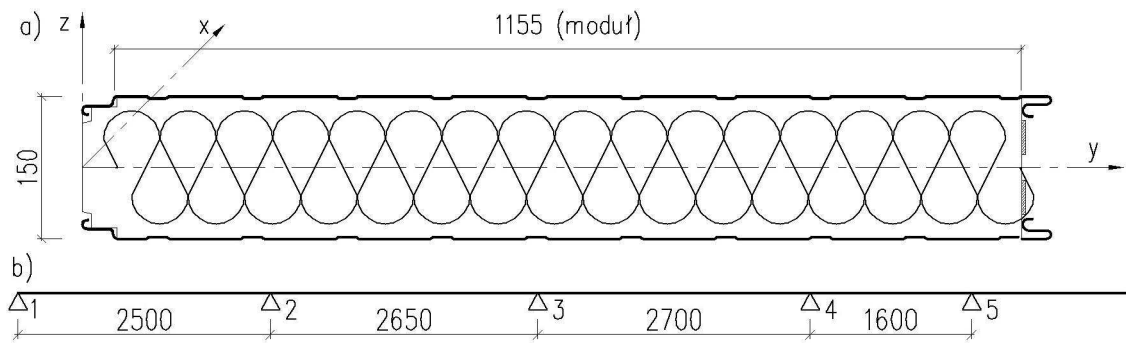
Rys.1 Schemat konstrukcji ściany południowej hali obudowanej płytami z rdzeniem styropianowym.



Rys.2. Schemat konstrukcji ściany wschodniej hali obudowanej płytami z rdzeniem styropianowym.

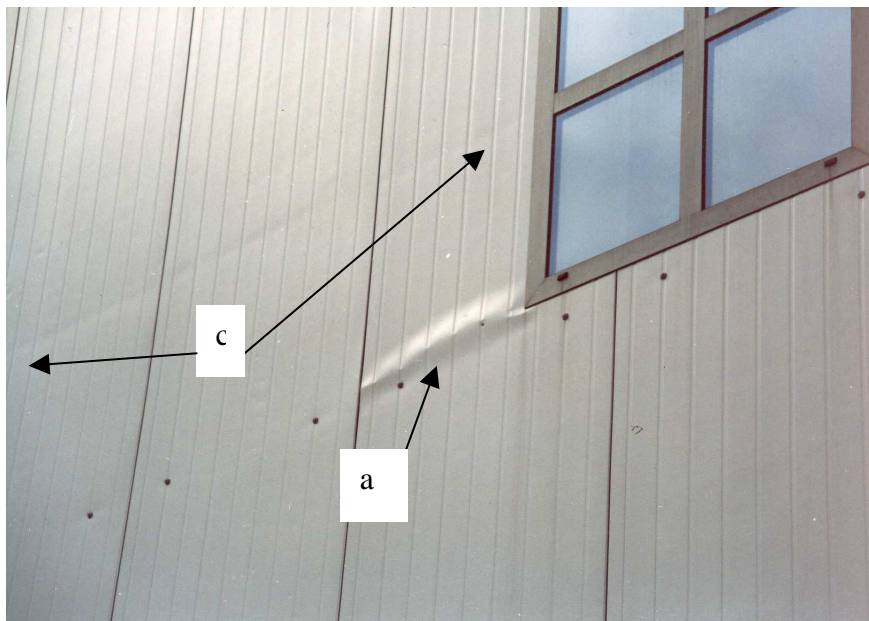
Uszkodzenia polegały na lokalnej utracie stateczności okładzin zewnętrznych płyt warstwowych. Uszkodzenia pokazano na rysunkach 4, 5 i 6.

W obudowie zastosowano płyty ścienne grubości 150 mm z rdzeniem styropianowym w okładzinie stalowej o grubości 0,5 mm. Płyty o szerokości jednego modułu 1155mm przedstawiono na rys.3. Wykonano je w kolorze srebrnym – RAL 9006, zakwalifikowanym przez producenta do jasnej grupy kolorów II-jej grupy. Przekrój poprzeczny płyty pokazano na rys. 3a. Schemat podparcia jednej z najbardziej uszkodzonych płyt (skrajna z prawej strony elewacji południowej), czteroprzęsłowej przedstawiono na rys. 3b.

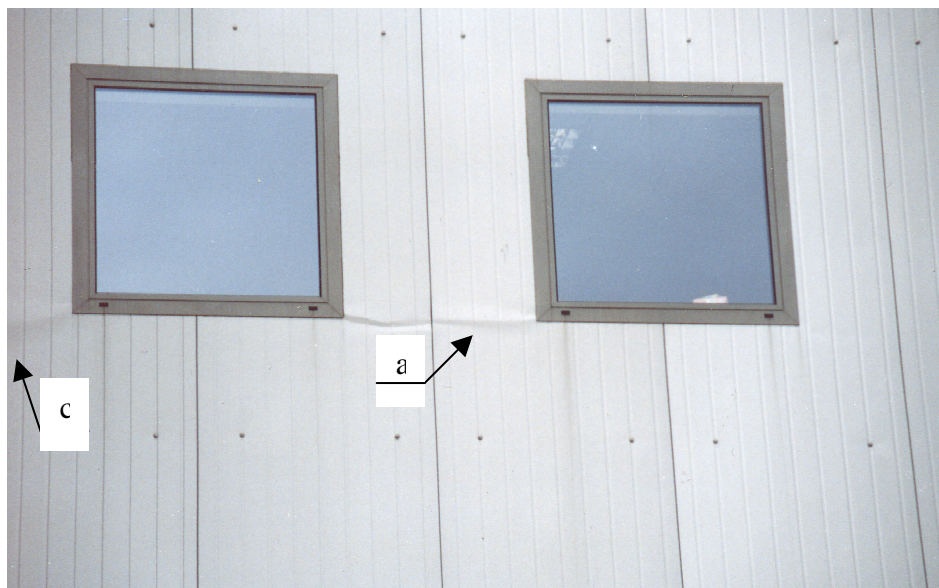


Rys.3. Przykładowy: a)przekrój poprzeczny, b) schemat statyczny analizowanej płyty.

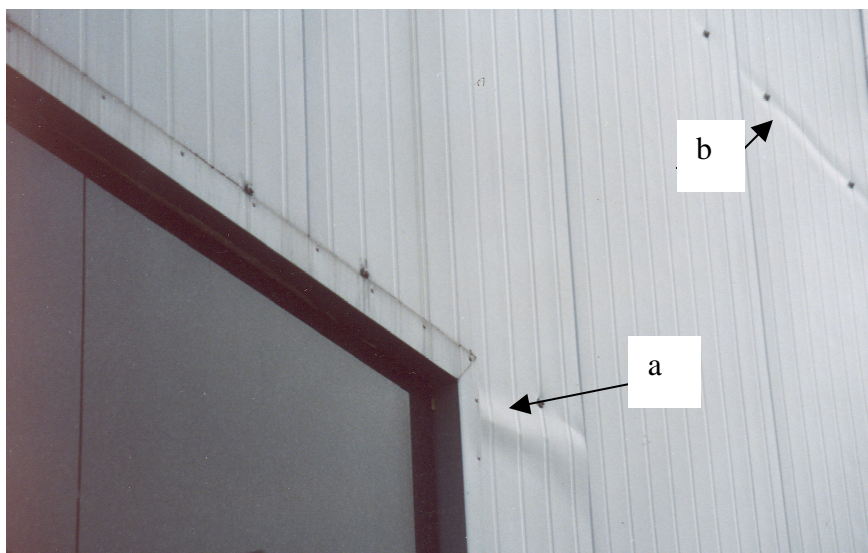
Na rysunkach 4, 5 i 6 zaprezentowano uszkodzenia płyt warstwowych w postaci lokalnej utraty stateczności w postaci: a – wybrzuszenia, b – załamania okładziny w miejscu łączników, c – wklęsłego załamania okładziny między ryglami.



Rys.4. Lokalna utrata stateczności okładziny zewnętrznej.



Rys.5. Uszkodzenia w sąsiedztwie otworów (a) i w miejscu łączników (b) – strona wschodnia.



Rys.6. Uszkodzenia w obszarze okiennym i w miejscu łączników – strona południowa.

3. Analiza uszkodzeń.

Próbami wyjaśnienia obciążeń wywołujących lokalną utratę stateczności okładzin zajmował się Berner (2005) w [1]. Przeprowadził badania i wskazał potrzebę miejscowego wzmocnienia płyt warstwowych poprzez zastosowanie „wymianów” koniecznych zwłaszcza w przypadku dużych otworów. Polska norma [12] uważa za takie, otwory większe niż 300 mm. Davies (2001) w [2] opisał przypadek marszczenia okładzin obudowy chłodni, narażonej na duże różnice temperatur, w miejscu łączników. W celu zapobieżenia marszczeniu się okładzin w miejscach docisku łączników do rygli Davies w [2] zaproponował (zgodnie z [13]) zastosowanie specjalnych płytek zaciskowych.

Davies w [2] rozróżnił duże i małe otwory w płytach warstwowych, stanowiących element lekkiej obudowy. Zauważył, iż jakiegokolwiek otwory stanowią zaburzenia w idealnej pracy płyty warstwowej.

Błędy w projektowaniu płyt obudowy z otworami na drzwi i okna prowadzą do uszkodzeń, a nawet awarii obudowy obiektu. Typowy prostokątny kształt otworów prowadzi do koncentracji naprężeń we wklęsłych narożach okładzin płyt. Stosunkowo najmniejsze spiętrzenie naprężeń występuje w płytach o otworach eliptycznych. Jednakże zastosowania eliptycznych kształtów otworów w obudowie hal jest znikome. Obróbka krawędzi otworów powinna być wykonywana w wytwórni. Duże otwory w płytach warstwowych zmniejszają sztywność giętą, wytrzymałość okładzin na rozciąganie i ścinanie oraz na ściskanie. Ponadto obciążenia wywołują skręcanie płyty, zwłaszcza od miejsc osłabionych otworem. Część obciążenia przyłożonego do osłabionej płyty warstwowej przenoszona jest przez połączenia na sąsiednią i kolejne płyty. Stamm i Witte (1974) [3] proponuje oszacowanie sztywności skrętej B_s płyt warstwowych z cienkimi okładzinami ze wzoru (1):

$$B_s = GI_T = \frac{4e^2bG_C}{\lambda^2 d_c} \left(1 - \frac{\tanh(0,5\lambda b)}{0,5\lambda b}\right), \quad (1)$$

gdzie: G_F – moduł sprężystości poprzecznej okładzin zdefiniowany w układzie xy , G_C – moduł sprężystości poprzecznej rdzenia, b – szerokość płyty, d_c – grubość rdzenia, e – odległość w osiach okładzin, I_T – moment bezwładności przekroju płyty.

Współczynnik λ wyznacza się ze wzoru (2):

$$\lambda = \sqrt{\frac{G_C(t_1 + t_2)}{G_F d_C t_1 t_2}}, \quad (2)$$

gdzie: t_1, t_2 – grubość okładziny zewnętrznej i wewnętrznej.

Höglund (1986) [4] adaptował doświadczalnie znany wzór na sztywność skrętną B_s płyty o przekroju skrzynkowym do postaci (3):

$$B_s = G_F I_T = G_F \frac{4A_0^2}{\oint ds/t} = \frac{8e^2 b^3 t G_F G_C}{6b^2 G_C + 27et G_F}, \quad (3)$$

gdzie: A_0 – powierzchnia całkowita przekroju poprzecznego płyty, $\oint ds$ - obwód przekroju płyty trójwarstwowej.

W wyniku przeprowadzonych badań Davies [2] podaje, iż ze wzoru (3) uzyskuje się zaniżoną sztywność skrętną dla paneli o szerokości $b \leq 1,2$ m.

Redystrybucję obciążeń między płytami z otworami przedstawiono w [2] i [12]. Wg [2] i [12] najbardziej obciążona jest płyta znajdująca się w bezpośrednim sąsiedztwie płyty z otworem, na którą przekazuje się około 70% obciążenia z płyty osłabionej otworem. Jednakże ta metoda daje błędne oszacowania wyteżenia płyt warstwowych z rdzeniem z wełny mineralnej. Rozkład sił działających na poszczególne panele został przedstawiony na rys.8.

Jeżeli znana jest siła ścinająca q_i w połączeniach wzdłużnych, to wg [2] można wyznaczyć naprężenia ściskające w okładzinach oraz naprężenia ścinające w rdzeniu. Całkowite naprężenie ścinające w rdzeniu τ_C może być wyznaczone jako suma naprężeń ścinających spowodowanych przez siłę ścinającą V i moment skręcający M_V [4] z wzoru (4):

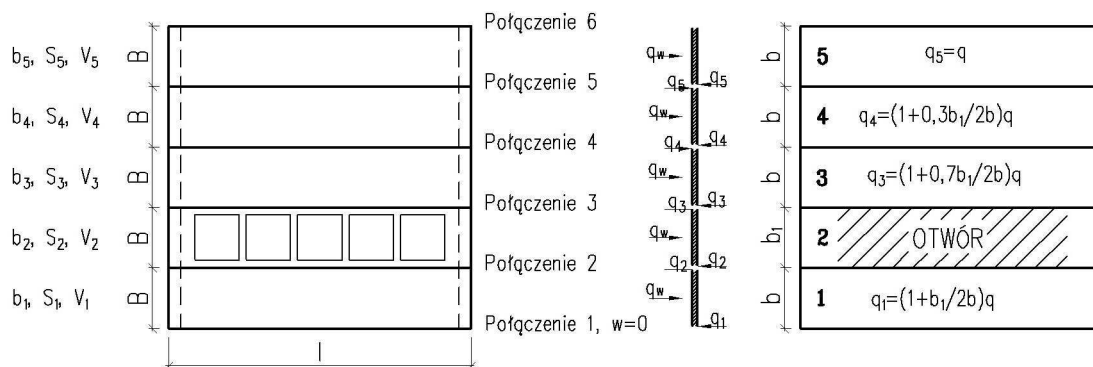
$$\tau_C = \tau_{C,S} + \tau_{C,V} = \frac{V}{eb} + \frac{27}{8} \frac{M_V}{eb^2}, \quad (4)$$

gdzie: τ_C – całkowite naprężenie ścinające, $\tau_{C,S}$ – naprężenie ścinające spowodowane siłą ścinającą V , $\tau_{C,V}$ – naprężenie ścinające spowodowane momentem skręcającym M_V .

Naprężenia ścinające w pierwszym panelu można wyznaczyć wg [2] ze wzoru (5):

$$\tau_C = \frac{(q_w + q_2 - q_1)l}{2eb} + \frac{27(q_1 + q_2)l}{32eb}. \quad (5)$$

Na rysunku 7 pokazano obciążenia q_i płyt sąsiadujących z płytą obciążoną dużym otworem.



Rys.7. Przykład redystrybucji obciążeń wg [2] na sąsiednie płyty.

Otwory w płytach warstwowych redukują ich wytrzymałość na zginanie i ścinanie oraz na lokalną utratę stateczności, gdyż powierzchnia przekroju okładziny i rdzenia jest pomniejszona w danym przekroju, a następuje silna koncentracja naprężeń we wklęsłych narożach okładzin. Oszacowanie i skutki koncentracji naprężeń we wklęsłych narożach płyt trójwarstwowych z otworami nie jest dostatecznie rozpoznane. Jednak można skompensować skutki zmniejszenia wytrzymałości płyt za pomocą celowego rozwiązania konstrukcyjnego np. obramowania otworów.

Lepiej rozpoznane jest zagadnienie lokalnej utraty stateczności okładziny trójwarstwowego pasma płytowego nie obciążonego otworem [8]. Lokalną wytrzymałość okładzin stowarzyszoną z lokalną utratą stateczności płyt warstwowych bez otworów można oszacować wg [10], w przypadku równomiernego obciążenia wzdłuż osi x-x ze wzoru (6) i (7):

$$\text{dla } \frac{h}{g_i} > 0,4\sqrt[3]{\frac{E_i E_c}{(1-\nu^2)G_{xz}^2}} \text{ mamy } \sigma_{xkr} = 0,9\sqrt[3]{\frac{E_i E_c G_{xz}}{1-\nu_i^2}}, \quad (6)$$

$$\text{dla } \frac{h}{g_i} < 0,4\sqrt[3]{\frac{E_i E_c}{(1-\nu_i^2)G_{xz}^2}} \text{ mamy } \sigma_{xkr} = 0,58\sqrt[3]{\frac{E_i E_c g_i}{(1-\nu_i^2)h}}, \quad (7)$$

gdzie: E_i – moduł sprężystości okładziny, E_c – moduł sprężystości podłużnej rdzenia, G_{xz} – moduł sprężystości poprzecznej rdzenia, ν_i - współczynnik Poissona okładziny.

Deformację okładziny płyty warstwowej bez otworów autorzy [9] opisują równaniem (8), jak dla płyty ściskanej na podłożu sprężystym o sztywności C :

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \frac{Px\partial^2 w}{B\partial x^2} + \frac{Py\partial^2 w}{B\partial y^2} + \frac{C}{b} = 0 \quad (8)$$

gdzie: C - sztywność rdzenia, traktowanego jako podłoże sprężyste, E – moduł sprężystości podłużnej okładziny, t – grubość okładziny, ν – współczynnik Poissona okładziny, P_x , P_y – siły normalne w okładzinie ściskanej na szerokości jednostkowej.

Sztywność okładziny B – wyznacza się ze znanego wzoru (9):

$$B = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}. \quad (9)$$

W przypadku okładziny ściskanej jednokierunkowo siłą P_x rozwiązanie równania (8) ma postać (10):

$$P_{xkr} = \frac{3}{2}\sqrt[3]{2K^2 B}. \quad (10)$$

Normalne naprężenia krytyczne σ_{kr} wyznaczamy ze wzoru (11):

$$\sigma_{kr} = K\sqrt[3]{G_r E_r E}, \quad (11)$$

gdzie: G_r – moduł ścinania rdzenia, E_r – moduł sprężystości rdzenia.

Współczynnik K wg różnych autorów przedstawiany jest następująco: Plantema (1966) [6] – $K=0,85$, Allen (1969) [7] – $K=0,78$, Morris [2] – $K=0,75$, wytyczne europejskie [11] – $K=0,80$. Warto zwrócić tutaj uwagę na to, że w rozwiązaniu równania (8) w postaci (11) współczynnik K zależy od rozkładu po długości naprężeń w okładzinach. Można zauważyć to w rozwiązaniu [5].

4. Podsumowanie.

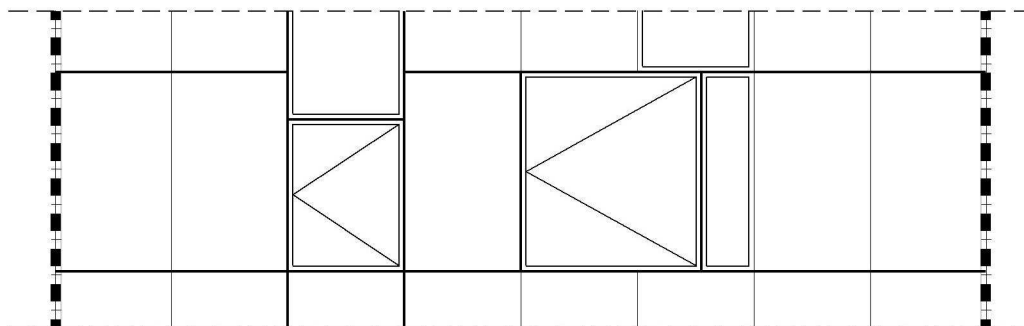
Lokalną utratą stateczności okładzin trójwarstwowego pasma płytowego zajmowało się wielu autorów. Natomiast nie rozwiązano teoretycznie przypadków lokalnej utraty stateczności okładzin w obrębie naroży wyciętych otworów.

W pracy wskazano na przyczyny lokalnej utraty stateczności okładzin płyt warstwowych z otworami mimo braku w literaturze podstawowych rozwiązań teoretycznych. Jednakże ustalone technologie produkcji i montażu płyt obudowy wskazują przede wszystkim, na potrzebę ulepszenia rozwiązań konstrukcyjnych płyt obudowy biorąc pod uwagę rozpoznane przyczyny występowania nieestetycznych uszkodzeń płyt warstwowych.

W zabudowanych płytach warstwowych obudowy można wyróżnić krytyczne miejsca i krytyczne linie. Są to: 1) linie podparcia płyt na ryglach, 2) miejsca łączenia płyt z ryglami, 3) miejsca wklęsłych naroży wycięć w płytach ciągłych, 4) miejsca docisku łączników do okładzin.

W wymienionych miejscach należy zwracać uwagę na prawdopodobieństwo wzajemnego nakładania się wyteżenia od obciążeń: 1) ssaniem lub parciem wiatru, 2) temperaturą - obciążenie płyt warstwowych temperaturą należy rozpatrywać jako stowarzyszone z kolorem płyt oraz z ekspozycją na promieniowanie słoneczne), 3) dociskiem łączników, 4) spiętrzeniem naprężeń we wklęsłych narożach okładzin płyt warstwowych z otworami, 5) skręceniem płyty warstwowej w przekrojach osłabionych otworami, zwłaszcza prostokątnymi, 6) obciążenia płyt sąsiadujących z płytami obciążonymi otworami.

Biorąc powyższe pod uwagę należy: 1) rozmieszczać rygle (stanowiące zasadniczą konstrukcję wsporczą płyt obudowy) tak, aby obciążenia były przekazywane z płyty bezpośrednio na rygle szkieletu konstrukcji nośnej ściany, a nie za pośrednictwem obciążenia płyt skręcaniem, 2) okna również nie powinny obciążać płyt skręcaniem, 3) rozciąć płyty ciągłe w miejscach krytycznego nakładania się wyteżenia od obciążenia wiatrem, temperaturą, łącznikami i korbami. Przykłady unikania kumulacji naprężeń w okładzinach pokazano na rys. 8. Amortyzowanie przemieszczeń i odkształceń w rozciętych miejscach krytycznych można uzyskać za pomocą pasmowych przekładek ze spienionych tworzyw sztucznych.



Rys. 8. Przykłady unikania kumulacji naprężeń w okładzinach.

Rozmieszczenie okien, drzwi i innych otworów w obudowie oraz kolor płyt powinno być przedmiotem projektu elewacji stowarzyszonego z systemem rygli stanowiących konstrukcję

wsporczą płyt. W projekcie konstrukcji elewacji należy unikać kumulacji wyteżenia obciążeniem wiatrem i temperaturą oraz od obciążeń montażowych.

W płytach z otworami występuje silna koncentracja wyteżenia (spiętrzenie naprężeń) w narożach wklęsłych, przyczyniając się do powstania lokalnych uszkodzeń stalowych okładzin płyty warstwowej.

Należy zwracać uwagę na wyżej opisane zjawiska stosując wytyczne producentów np. [13] [14] i norm [11], [12].

Należy nadmienić, że trójwarstwowe płyty dwuprzęsłowe są bardziej wyteżone niż płyty jednoprzęsłowe [8], w których wyteżenie od nagrzewania okładzin jest znikome. W trójwarstwowych płytach ciągłych, nad podporami sumują się wyteżenia wywołane obciążeniem wiatrem, temperaturą oraz dociskiem łączników łączących płyty z ryglami. Spiętrzenie naprężeń w narożach okładzin z otworami jest również znaczące i nie może być pomijane.

Uszkodzenia w postaci lokalnych sfałdowań okładzin psują wygląd elewacji obiektów, rzadko jednakże świadczą one o utracie nośności oraz właściwości termoizolacyjnych płyt warstwowych. Płyty takie mogą być naprawiane na obiekcie, pod warunkiem estetycznego maskowania miejsc naprawianych.

Literatura.

1. Berner K., Pfaff K.: Openings in sandwich panels, Institute for Sandwich Technology, Mainz 2005;
2. Davies J.M.: Lightweight Sandwich Construction, Blackwell Science, Oxford 2001;
3. Stamm K., Witte H.: Sandwichkonstruktionen, Springer-Verlag, Wiedeń 1974;
4. Höglund T.: Load Bering strength of sandwich panels walls with window openings, Proceedings of IABSE Colloquium, Stockholm 1986, IABSE Reports Vol 49, s. 349-356;
5. Gierczak J., Kowal Z.: Wyboczenie rozwarstwiające okładzin płyt trójwarstwowych z rdzeniem styropianowym, XXII Konferencja naukowo – techniczna Szczecin – Międzyzdroje, Awarie Budowlane 17-20 maja 2005;
6. Plantema F.J.: Sandwich Construction, John Willey and Sons, New York, 1966;
7. Allen H.G.: Analysis and Design of Structure Sandwich Panels, Pergamon Press, Oxford 1969;
8. Kowal Z. Delaminacyjna niestateczność powłok kompozytowych na elementach metalowych, IX Międzynarodowa Konferencja Konstrukcji Metalowych, Kraków 26-30 1995, T1;
9. Rapp P., Szostak W.: Analiza lokalnej utraty stateczności okładzin płyt warstwowych, część 1 i 2, Metalpress 7 (czerwiec), 8 (październik) 2004;
10. Kowal Z.: Wybrane działy z konstrukcji metalowych część III, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1979, Cz. III (Rozdział 8. Metalowe płyty fałdowe i warstwowe, s. 69-99);
11. European Recommendation for Sandwich Panels, 23.10.2000, ECCS/CIB Report by the Joint Committee;
12. Polska Norma PN-84/B-03230, Lekkie ściany osłonowe i przekrycia dachowe z płyt warstwowych żebrowych – Obliczenia statyczne i projektowanie;
13. Paroc Panel System 1995, Design of Paroc walls. Design Guidelines of Paroc Sandwich Panels;
14. Kingspan, Materiały techniczne 2006.