

dr hab. inż. Józef Pelc, prof. UWM^{a)}*^{a)}Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie / University of Warmia and Mazury in Olsztyn

*Autor korespondencyjny / Corresponding author: joseph@uwm.edu.pl

Ocena bezpieczeństwa stateczności stosu załadowanych stalowych palet słupkowych

Stability Safety Assessment for a Stack of Loaded Steel Post Pallets

Оценка безопасности стабильности стека загруженных стальных стоечных поддонов

ABSTRAKT

Cel: Opracowanie sposobu oceny bezpieczeństwa zestawiania załadowanych palet w stos. Przedstawienie przykładowej ścieżki analizy stateczności stosu konkretnych palet słupkowych przeznaczonych do składowania opon pneumatycznych.

Metoda: Ze względu na aktualny brak norm dotyczących oceny stateczności stosu palet, spiętrzone palety słupkowe potraktowano jako samostateczną konstrukcję wielokondygnacyjną bez stężeń. Bazując na aktualnie obowiązującej w Unii Europejskiej normie dotyczącej projektowania konstrukcji stalowych, przeprowadzono analizy nośności słupków palety i równowagi stosu złożonego z kilku palet poddanego działaniu ciężaru własnego i ładunków oraz sił poziomych wynikających ze wstępnych imperfekcji globalnych przechyłowych i lokalnych łukowych. Uwzględniono także oddziaływanie wózka widłowego na stos.

Wyniki: Na podstawie obliczonej wartości mnożnika obciążenia krytycznego dla stosu pięciu załadowanych palet stwierdzono, że stos stanowi układ konstrukcyjny wrażliwy na efekty drugiego rzędu i wymaga uwzględnienia wpływu deformacji na wartości sił wewnętrznych w jego elementach. Zgodnie z normą określono wartość wstępnej imperfekcji przechyłowej stosu i wartość obliczeniową wstępnej imperfekcji łukowej słupka palety. Wyznaczono siły poziome działające na stos wynikające z imperfekcji przechyłowych i łukowych. Zastosowanie proponowanego sposobu do analizy stateczności rzeczywistego stosu złożonego z pięciu palet słupkowych załadowanych oponami pneumatycznymi pozwoliło stwierdzić, że we wszystkich przypadkach możliwych przechyłach spełnione są warunki nośności wszystkich najbardziej wyężonych słupków, tj. słupków dolnej palety. Wykazano, że moment sił dających do wywrócenia stosu jest dużo mniejszy niż moment ustateczniający go. Stąd warunek równowagi statycznej związany z niebezpieczeństwem wywrócenia stosu wokół krawędzi dolnej palety spoczywającej na posadzce jest spełniony ze znacznym zapasem.

Wnioski: Siły poziome działające na stos palet będące wynikiem imperfekcji przechyłowych i łukowych układu oraz siła związana z oddziaływaniem wózka widłowego stwarzają niebezpieczeństwo zawalenia się stosu. Przyczyną tego zjawiska może być zarówno wyczerpanie nośności słupka palety, jak i sztywny obrót całego stosu względem jego dolnej krawędzi. Proponowana metoda umożliwi skuteczne określanie bezpieczeństwa składowania załadowanych palet słupkowych ułożonych jedna na drugiej. Zostało ono określone warunkami nośności słupków najniższej położonej palety oraz warunkiem statyki zapewniającym niewywracalność całego stosu palet.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo wytrzymałościowe, stateczność, imperfekcja, paleta, stos, magazynowanie

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

Przyjęty: 05.05.2017; Zrecenzowany: 12.07.2017; Opublikowany: 30.09.2017;

Proszę cytować: BiTP Vol. 47 Issue 3, 2017, pp. 14–26, doi: 10.12845/bitp.47.3.2017.1;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-NC-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

ABSTRACT

Aim: Developing a method to evaluate the safety of stacking loaded pallets. Presenting an exemplary stability analysis path for a stack of specific post pallets designed for the storage of pneumatic tyres.

Method: Due to the current lack of standards for assessing pallet stack stability, stacked post pallets were treated as a self-stable multi-storey construction without bracings. Based on the current standard binding in the European Union for the design of steel structures, analyses of the load capacity of pallet posts and the balance of a stack of several pallets subjected to its dead weight and loads as well as horizontal forces resulting from initial global sway and local bow imperfections were performed. The impact of the forklift truck on the stack was also taken into account.

Results: Based on the calculated value of the critical load multiplier for the stack of five loaded pallets, it was found that the stack is a structure sensitive to second order effects and there is a need to take into consideration the influence of deformations on internal force values in its elements. According to the standard, the value of the stack initial sway imperfection and the design value of the pallet post's initial bow imperfection were determined. Horizontal forces acting on the stack resulting from the sway and bow imperfections were determined. The application of the proposed method for the stability analysis of an actual stack composed of five post pallets loaded with pneumatic tyres made it possible to conclude that in all cases of possible sways the load capacity conditions for the most stressed posts, i.e. the posts of the lowermost pallet, were fulfilled. It was evidenced that the moment of the

forces attempting to overturn the stack is much smaller than the stabilising one. Hence, the static balance condition associated with the risk of the stack overturning around the edge of the lowermost pallet resting on the floor was met with a considerable margin.

Conclusions: The horizontal forces acting on the stack of pallets resulting from the sway and bow imperfections of the system and the force associated with the forklift truck create the risk of the stack's collapse. The reason for this phenomenon can be both exhausting the pallet post's load capacity and the entire stack's rigid rotation around its lower edge. The proposed method makes it possible to effectively determine the safety for storage of loaded post pallets placed one on the other. It was determined based on the load capacity conditions for the posts from the lowermost pallet and on the static condition ensuring that the whole pallet stack would not be overturned.

Keywords: strength safety, stability, imperfection, pallet, stack, warehouse

Type of article: original scientific article

Received: 05.05.2017; Reviewed: 12.07.2017; Published: 30.09.2017;

Please cite as: BiTP Vol. 47 Issue 3, 2017, pp. 14–26, doi: 10.12845/bitp.47.3.2017.1;

This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

АННОТАЦИЯ

Цель: Разработка метода оценки безопасности установки загруженных поддонов в стек. Представление примера анализа устойчивости конкретного стека стоечных поддонов, предназначенных для хранения пневматических шин.

Метод: В связи с отсутствующими в настоящее время стандартами для оценки устойчивости стека поддонов, уложенных один на другом, поддоны рассматривались как отдельная стабильная многоуровневая конструкция без фиксации. На основании действующего в ЕС стандарта для проектировки стальных конструкций были проведены анализы грузоподъемности стоек поддонов и баланса стека поддонов, состоящего из нескольких поддонов, которые находились под воздействием своего собственного веса и груза, а также горизонтальных сил, возникающих из-за первоначальных наклонов и локальных прогибов. Было учтено также влияние вилочного погрузчика на стек.

Результаты: На основании вычисленного значения множителя критической нагрузки для стека, состоящего из пяти загруженных поддонов, было установлено, что стек является структурной системой, чувствительной к эффектам второго уровня, и поэтому в вычислениях нужно учитывать влияние отклонений значений внутренних сил в его компонентах. В соответствии со стандартом было определено значение первоначальных отклонений от вертикали стека и вычислительное значение начального прогиба стойки поддона. Были определены горизонтальные силы, действующие на стойку, возникающие из-за отклонений от вертикали и прогибов. Применение предлагаемого метода для анализа устойчивости реальной стойки из пяти поддонов, загруженных пневматическими шинами, показал, что во всех случаях возможных наклонов были соблюдены условия грузоподъемности всех наиболее нагруженных стоек, то есть стоек нижнего поддона. Было установлено, что момент силы приводящей к опрокидыванию стека есть намного меньше, чем момент обеспечивающий его стабильность. Следовательно, условие статического равновесия, связанное с опасностью опрокидывания стека вокруг грани нижнего поддона, находящегося на полу, выполняется с существенным запасом.

Выводы: Горизонтальные силы, действующие на стек поддонов и являющиеся результатом наклонов и прогибов структуры, а также сила, связанная с воздействием вилочного погрузчика, создают угрозу разрушения стека. Причиной этого явления может быть либо истощение грузоподъемности стека поддона либо жесткое вращение целого стека по отношению к его нижней грани. Предложенный метод позволяет эффективно определить безопасность хранения загруженных стоечных поддонов друг на друге. Оно зависит от условий грузоподъемности стоек самого нижнего поддона, а также от статичности, обеспечивающей стабильность целого стека поддонов.

Ключевые слова: безопасность прочности, статика, наклон, поддон, стек, хранение

Вид статьи: оригинальная научная статья

Принята: 05.05.2017; Рецензирована: 12.07.2017; Опубликована: 30.09.2017;

Просим ссылаться на статью следующим образом: BiTP Vol. 47 Issue 3, 2017, pp. 14–26, doi: 10.12845/bitp.47.3.2017.1;

Настоящая статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией CC BY-NC-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

Wprowadzenie

Zapewnienie ciągłości dostaw produktów przemysłowych na rynek wiąże się z koniecznością ich właściwego składowania, najczęściej w pomieszczeniach magazynowych. Przykładowo opon pneumatycznych nie można przechowywać na wolnym powietrzu ze względu na destrukcyjny wpływ promieniowania słonecznego na właściwości gumy oraz możliwość zanieczyszczenia wnętrza opon. Ponadto składowane opony muszą być odpowiednio ułożone, aby nie ulegały zmianie ich właściwości wytrzymałościowe i eksploatacyjne. Dlatego do ich przechowywania wykorzystywane są powszechnie palety słupkowe. Są one zbudowane ze sztywnej płyty dolnej do składowania produktów (konstrukcyjnie może

Background

To ensure the continuity of the market deliveries of industrial products it is necessary to store them properly, usually in warehouses. For instance, pneumatic tyres cannot be stored outdoors due to the destructive impact of solar radiation on the properties of rubber and the possibility that impurities get to the inside of tyres. Furthermore, stored tyres must be properly arranged to preserve their strength and operating properties. For these reasons, post pallets are widely used for their storage. They are made of a rigid lowermost panel (which may have a grid structure) for storing products and of posts attached to it, with their uppermost part equipped with devices preventing

mieć postać rusztu) oraz przymocowanych do niej słupków, wyposażonych u góry w elementy ograniczające przesuw kładzonej na niej kolejnej palety i umożliwiające piętrzenie.

Ze względu na ograniczone powierzchnie składowe załadowane palety są spiętrzane, tj. układane jedna na drugiej. W przypadku takiego rozwiązania osoby zarządzające logistyką w różnych firmach stawiają ważne pytanie, ile palet można ułożyć w stosie, aby składowanie było bezpieczne. Obawy co do ryzyka zawalenia się stosu palet wynikać mogą z obserwacji przeprowadzanych doświadczeń polegających na próbie ułożenia na sobie wielu jednakowych elementów. Pomimo wielkiej staranności w precyzyjnym dokładaniu kolejnych elementów, zawsze przy dołożeniu n -tego lub $n+1$ -szego, stos elementów przewracał się. W mechanice zjawisko tego typu związane jest z niestatecznością, czyli niestatecznym (chwiejnym, niebezpiecznym) stanem równowagi układu. Zarówno w budownictwie, jak i w budowie maszyn wymaga się, aby obciążone elementy oraz całe ustroje konstrukcyjne/układy znajdowały się w statecznym stanie równowagi. Powracając do stosu zestawianego z jednakowych elementów, należy wyjaśnić, że przyczynę niemożności ułożenia dowolnie wysokiego stosu stanowią: niedokładność wykonania poszczególnych elementów i niedokładne ustawianie ich środków ciężkości na pionowej osi oraz nieidealnie płaskie lub poziome podłoże. W języku technicznym te niedoskonałości nazywane są imperfekcjami.

Podczas gdy literatura naukowa dotycząca regałów paletowych jest bardzo bogata [1–3], istnieje mało opracowań opisujących problemy składowania palet w stosach wolnostojących [4]. Regały zasadniczo różnią się od palet tym, że stopy ich słupów są kotwione do podłoża. Palety są tylko stawiane na posadzce magazynu. W artykule [4] autorzy zajmują się odpornością konstrukcji palety skrzyniowej na: zginanie, piętrzenie, stateczność, uderzenie przy swobodnym spadku, unoszenie za pomocą wózka widłowego oraz odpornością na uderzenia poziome obiema krawędziami i nogami. Przedstawili wyniki wykonanych analiz metodą elementów skończonych, użyteczne w procesie projektowania palet.

W Polsce poprzednio obowiązywały dwie normy dotyczące palet [5–6], przy czym pierwsza została unieważniona w 2012 roku, a druga w 2015. Nie wprowadzono norm je zastępujących. W normie [6] podano sposób sprawdzania odporności palety na piętrzenie, polegający na doświadczalnej weryfikacji zmian pewnych wymiarów kontrolnych w załadowanych paletach stosu. Nie wskazano jednak analitycznej metody oceny bezpieczeństwa dotyczącego stateczności stosu palet. Taka metoda byłaby bardzo pomocna dla wielu firm użytkujących określone palety. Pozwoliłaby na wyznaczenie liczby palet, które mogą być bezpiecznie układane w stosach.

W artykule zaproponowano metodę oceny bezpieczeństwa stosu palet bazującą na przepisach zawartych w aktualnie obowiązującej normie [7]. Przedstawiono sposób określenia sił poziomych działających na stos palet, wynikających z imperfekcji przechyłowych i łukowych. Uwzględniono również siłę oddziaływania wózka widłowego na stos palet, której wartość przyjęto na podstawie pracy [8]. Przykładowy przebieg analizy według proponowanej metody przedstawiono w odniesieniu do konkretnej konstrukcji palet słupkowych wykorzystywanych do składowania opon pneumatycznych.

the next pallet from moving which is placed on the top to enable their stacking.

Due to the limited storage areas, loaded pallets are stacked one on the other. In the case of such a solution people in charge of logistics working in various companies ask themselves how many pallets can be stacked to ensure storage safety. Concerns about the risk of the stack collapsing may result from the observation of experiments involving attempts to stack many identical elements. Despite the great care taken to precisely place the successive elements, the stack always collapsed after adding the n th or $n + 1$ th element. In mechanics this phenomenon is associated with instability, i.e. an unsteady and insecure equilibrium of the system. In construction and mechanical engineering it is required for loaded element and entire building structures/systems to be in a stable equilibrium. As for a stack made of identical elements, it should be clarified that the reasons why it is impossible to stack a stack of any height are the inaccuracy with which particular elements are made, the imprecise placement of their load centre on a vertical axis and the not perfectly flat or not ideally horizontal foundation. In technical language these irregularities are called imperfections.

While the scientific literature on pallet racks is very extensive [1–3], there are few studies describing issues related to storing pallets in free-standing stacks [4]. Racks and pallets differ significantly in that in the former post footings are bolted to the foundation. Pallets are just placed on the warehouse floor. In article [4] the authors discuss the stability and endurance of box pallet to bending, stacking endurance, resistance to impact after a free fall, to lifting with a forklift truck and endurance to horizontal impact with both edges and legs. They presented the results of the analyses performed with the finite element method, which can be useful in the pallet design process.

Previously in Poland two standards referring to pallets were in place [5–6]; the first was annulled in 2012, the second in 2015, and no standards replacing them were introduced. The standard [6] specified the method of checking pallets' stacking endurance consisting of the experimental verification of changes of selected control dimensions in the pallets placed on a stack; however, no analytical method of safety assessment referring to the stability of a pallet stack was provided. Presenting such a method would be very useful from the point of view of companies which work with specific types of pallets, enabling the determination of the number of pallets which can be safely placed on a stack.

The study suggests a method of assessing the safety of a pallet stack based on the currently valid standard [7]. The method of determining horizontal forces impacting a pallet stack caused by sway and bow imperfections was presented. The impact of the forklift truck on a pallet stack was also included, the value of which was adopted on the basis of study [8]. An exemplary analysis based on the proposed method was presented in reference to a specific structure of post pallets used for storing pneumatic tyres.

Metody

W celu oceny bezpieczeństwa stosu jednakowych, załadowanych palet ustawionych jedna na drugiej przyjęto, że układ stanowi samostateczną ramę wielokondygnacyjną. Tok postępowania prowadzący do warunków rozstrzygających o bezpieczeństwie stosu polegał na:

- określeniu wrażliwości stosu palet na efekty drugiego rzędu,
- wyliczeniu parametrów imperfekcji przechyłowych i łukowych oraz wynikających z nich sił poziomych,
- uwzględnieniu siły oddziaływania wózka widłowego,
- sprawdzeniu warunku nośności najbardziej obciążonego słupka dolnej palety,
- sprawdzeniu warunku statyki na wywrócenie stosu.

W pracy założono, że:

- palety są załadowane równomiernie,
- podłoga palety jest nieodkształcalna (ma postać bardzo sztywnego rusztu),
- posadzka magazynu jest pozioma i wyrównana,
- stosy palet znajdują się w magazynie i nie są narażone na działanie wiatru.

Wrażliwość układu na efekty drugiego rzędu

Układy konstrukcyjne, w których należy uwzględnić wpływ ich deformacji na siły wewnętrzne, to układy wrażliwe na efekty drugiego rzędu. Przyjmuje się, że tak jest, jeżeli wartość mnożnika obciążenia krytycznego α_{cr} w przypadku analizy sprężystej (plastycznej) spełnia warunek [7]:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} < 10 \quad (15) \quad (1)$$

gdzie: F_{cr} – obciążenie krytyczne odpowiadające globalnej formie niestateczności i początkowej sztywności sprężystej układu; F_{Ed} – obciążenie obliczeniowe działające na konstrukcję. Ramy samostateczne na ogół są układami wrażliwymi na efekty drugiego rzędu.

Imperfekcje przechyłowe i łukowe

Na skutek przewidywanego przechyłu stosu palet (ryc. 1a), siły pionowe od ich ciężaru własnego i ładunków dają niezerowy moment względem punktu przebicia płaszczyzny posadzki w odniesieniu do pionowej osi stosu. Na ryc. 1b przedstawiono konfigurację stosu palet wynikającą ze wstępnej imperfekcji przechyłowej. Ciężary przyłożono w punktach oparcia podłóg (płyt) palet o słupki. Ponieważ moment siły może być przedstawiony jako para sił o odpowiednio przesuniętych kierunkach, to można dalej rozważać nieprzechylony stos (ryc. 1c), ale obciążony siłami poziomymi realizujący wspomniany wcześniej moment, tj. moment o tej samej wartości.

Methods

In order to assess the safety of a stack of identical loaded pallets placed one on the other, it was assumed that the structure constitutes a self-stable multilevel frame. The procedure used to determine the safety of the stack consisted of the following:

- determining the sensitivity of the pallet stack to second order effects,
- calculating sway and bow imperfections and the resulting horizontal forces,
- taking into account the impact made by a forklift truck,
- checking the condition of capacity of the most loaded post of the lowermost pallet,
- checking the static condition's impact on the stack's collapse.

In the study it was assumed that:

- pallets are evenly loaded,
- the pallet's floor is undeformable (made of a very rigid grid),
- the warehouse floor is horizontal and even,
- pallet stacks are inside the warehouse and are not exposed to wind.

Structure's sensitivity to second order effects

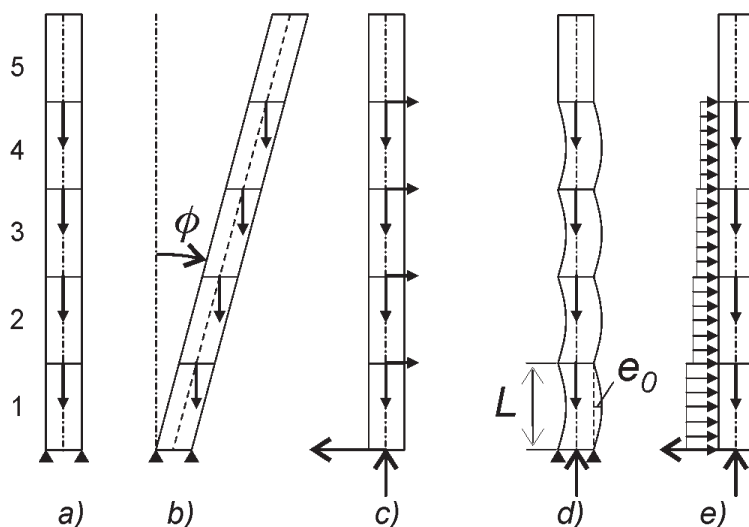
Structural systems in which the influence of their deformations on internal forces should be considered are systems sensitive to second order effects. It is assumed that systems have the above property if the value of the critical load multiplier α_{cr} for elasticity (plasticity) analysis meets condition [7]:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} < 10 \quad (15) \quad (1)$$

where: F_{cr} – critical load corresponding to the global form of instability and the initial elastic modulus of the system; F_{Ed} – design load impacting the structure. Self-static frames are usually sensitive to second order effects.

Sway and bow imperfections

As a result of the anticipated sway of the pallet stack (fig. 1a) vertical forces caused by their dead weight and loads give rise to a non-zero moment about the point where the vertical axis of the stack crosses the floor surface. Fig. 1b presents the configuration of the pallet stack caused by the initial sway imperfection. Loads were placed in the points where the pallet floors (plates) touch the posts. As the moment of force can be expressed as a pair of forces with properly shifted directions, an unswaying stack can still be considered (fig. 1c), but loaded with horizontal forces producing the moment mentioned before, i.e. a moment of the same value.



Rycina 1. Imperfekcje: a) stos palet, b) imperfekcja przechyłowa, c) obciążenie poziome od przechyłu, d) imperfekcje łukowe, e) obciążenie poziome od imperfekcji łukowych (na dole oznaczono wypadkowe reakcje podłoża na stos)

Figure 1. Imperfections: a) pallet stack, b) sway imperfection, c) horizontal forces due to sway, d) bow imperfections, e) horizontal forces due to bow (resultant foundation reactions to the stack are marked at the bottom)

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Wielkość imperfekcji przechyłowej stosu palet określa wzór:

$$\varphi = \alpha_h \alpha_m / 200 \quad (2)$$

$$\alpha_h = 2 / \sqrt{H}, \text{ lecz } 2/3 \leq \alpha_h < 1,0 \text{ i } \alpha_m = \sqrt{0,5(1+m^{-1})} \quad (3)$$

gdzie: H – wysokość konstrukcji (stosu palet) w metrach, m – liczba słupów w rzędzie.

Imperfekcje łukowe związane są z przewidywanym wyginaniem się słupków palet, przy czym zakłada się najbardziej niekorzystną sytuację, tj. że słupki mają na końcach zamocowania przegubowe (ryc. 1d). Miarą imperfekcji łukowej jest iloraz strzałki wygięcia słupka e_0 i jego wysokości L , tj. e_0/L . Zakładane wygięcie słupka można skojarzyć z wywołującym go obciążeniem ciągłym działającym prostopadle do osi słupka (ryc. 1e), a tym samym zastąpić go statycznie równoważnymi dwiema siłami poziomymi działającymi na końcach słupków.

Oddziaływanie wózka widłowego

W magazynach palety są przemieszczane i spiętrzane za pomocą wózków widłowych. W ocenie bezpieczeństwa stosu palet należy wziąć pod uwagę wpływ oddziaływania wózka na stateczność stosu. Wartość siły oddziaływania wózka na stos można zaczerpnąć z literatury dotyczącej regałów paletowych [8].

Nośność najbardziej obciążonego słupka dolnej palety

Z wcześniejszych rozważań wiadomo, że na stos palet działają siły pionowe i poziome. Wynika stąd, że słupki palet są ściskane i zginane. W krytycznej sytuacji najbardziej obciążone słupki palety usytuowanej najniżej w stosie mogą utracić nośność i ulec wyboczeniu. Skutkiem tego byłaby utrata

The value of sway imperfection of a pallet stack is calculated based on the following formula:

$$\varphi = \alpha_h \alpha_m / 200 \quad (2)$$

$$\alpha_h = 2 / \sqrt{H}, \text{ but } 2/3 \leq \alpha_h < 1,0 \text{ and } \alpha_m = \sqrt{0,5(1+m^{-1})} \quad (3)$$

where: H – height of the structure (pallet stack) in metres, m – the number of posts in a row.

Bow imperfections are associated with the expected bending of pallet posts; the worst case scenario is assumed, i.e. with the posts ending with articulated joints (fig. 1d). The measure of bow imperfection is the quotient of the deflection of post e_0 and its height L , i.e. e_0/L . The assumed deflection of the post can be associated with the continuous load causing it acting perpendicularly to the post's axis (fig. 1e), and therefore replaced with two statically equivalent horizontal forces acting on the ends of posts.

Forklift truck's impact

In warehouses pallets are moved and stacked with forklift trucks. When assessing the safety of a stack, the impact of the forklift truck on the stack's stability should be considered. The force value of the forklift truck's impact on the pile can be established based on the literature on pallet racks [8].

Capacity of the most loaded post of the lowermost pallet

It follows from the above that stacks of pallets are loaded by vertical and horizontal forces, i.e. pallet posts are compressed and bent, and in a critical situation the most loaded posts of the pallet placed lowermost in the stack can lose their load capacity and buckle. As a result the whole stack can lose its stability

stateczności całego stosu, a więc jego zawalenie się. Aby do tego nie dopuścić, należy spełnić określone w normie [7] warunki nośności najbardziej obciążonego słupka palety:

$$\gamma_{M1} \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \right) \leq 1 \quad (4)$$

$$\gamma_{M1} \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \right) \leq 1 \quad (5)$$

γ_{M1} – współczynnik częściowy związany ze statecznością słupka,

$N_{Ed}, M_{y,Ed}, M_{z,Ed}$ – wartości obliczeniowe siły ściskającej pręt i maksymalnych momentów zginających względem osi przekroju poprzecznego pręta, odpowiednio y i z,

$N_{Rk}, M_{y,Rk}, M_{z,Rk}$ – nośność charakterystyczna przekroju krytycznego przy obciążeniu odpowiednio siłą podłużną i momentami gnącymi leżącymi na osiach odpowiednio y i z.

$\Delta M_{y,Ed}, \Delta M_{z,Ed}$ – momenty wynikające z przesunięcia środka ciężkości przekroju klasy 4,

$\chi_y, \chi_z, \chi_{LT}$ – dwa współczynniki wybożenia giętnego i współczynnik zwężenia,

$k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$ – współczynniki interakcji obliczane wg wzorów podanych w załączniku B normy [7], np.

$$k_{yy} = C_{my} \left[1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{\gamma_{M1} N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right],$$

$$\text{lecz } k_{yy} \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{\gamma_{M1} N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right) \quad (6)$$

i przy liniowym wykresie momentów zginających słupek

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi, \quad \psi = M_{Ed,m} / M_{Ed,w}, \quad \text{lecz } C_{my} \geq 0,4 \quad (7)$$

$M_{Ed,m}, M_{Ed,w}$ – obliczeniowe wartości momentów zginających odpowiednio: mniejszy i większy w przekroju słupka z uwzględnieniem ich znaków.

Statyczna równowaga stosu palet

Ze względu na siły poziome działające na stos palet należy sprawdzić, czy obliczeniowy moment wywracający $M_{K,Ed}$ jest mniejszy od obliczeniowego momentu $M_{K,Rd}$ ustarczającego układu. Powinien zatem być spełniony warunek:

$$M_{K,Ed} / M_{K,Rd} < 1 \quad (8)$$

Powyższy warunek musi być spełniony w odniesieniu do możliwości obrotu układu względem obu krawędzi prostokątnej podstawy stosu.

Wyniki i dyskusja

Paleta słupkowa do magazynowania opon pneumatycznych (ryc. 2a) składa się ze sztywnej płyty dolnej (podłogi) o konstrukcji umożliwiającej podejmowanie i przemieszczanie palety za pomocą wózka widłowego. Do płyty przyspawane są cztery słupki, wyposażane u góry w elementy umożliwiające piętrowanie jednakowych palet w stosy. Zadaniem słupków jest

and collapse. To prevent this, it is necessary to meet the conditions for the load capacity of the most loaded post in the pallet specified in standard [7]:

$$\gamma_{M1} \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \right) \leq 1 \quad (4)$$

$$\gamma_{M1} \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \right) \leq 1 \quad (5)$$

γ_{M1} – partial coefficient associated with the stability of the post,

$N_{Ed}, M_{y,Ed}, M_{z,Ed}$ – design values of the rod compression force and maximum bending moments about the axis of the rod's cross-section, respectively y and z,

$N_{Rk}, M_{y,Rk}, M_{z,Rk}$ – characteristic load capacity for the dangerous section while applying longitudinal force and bending moments respectively on axes y and z respectively.

$\Delta M_{y,Ed}, \Delta M_{z,Ed}$ – moments caused by shifting the load centre of a class 4 section,

$\chi_y, \chi_z, \chi_{LT}$ – two coefficients of flexural buckling and the warp coefficient,

$k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$ – interaction coefficients calculated according to the formulae provided in Appendix B to standard [7], e.g.

$$k_{yy} = C_{my} \left[1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{\gamma_{M1} N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right],$$

$$\text{but } k_{yy} \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{\gamma_{M1} N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right) \quad (6)$$

and with a linear chart of bending moments acting on the post

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi, \quad \psi = M_{Ed,m} / M_{Ed,w}, \quad \text{but } C_{my} \geq 0,4 \quad (7)$$

$M_{Ed,m}, M_{Ed,w}$ – design values of bending moments; respectively the lowermost and the higher one, in the post's section, including their signs.

Static equilibrium of the pallet stack

Due to the horizontal forces acting on the pallet stack it should be verified whether the design overturning torque $M_{K,Ed}$ is lower than the design torque stabilising the system $M_{K,Rd}$. Therefore, the following condition should be met:

$$M_{K,Ed} / M_{K,Rd} < 1 \quad (8)$$

The above condition must be met in relation to the possibility of rotating the system against both edges of the rectangular base of the stack.

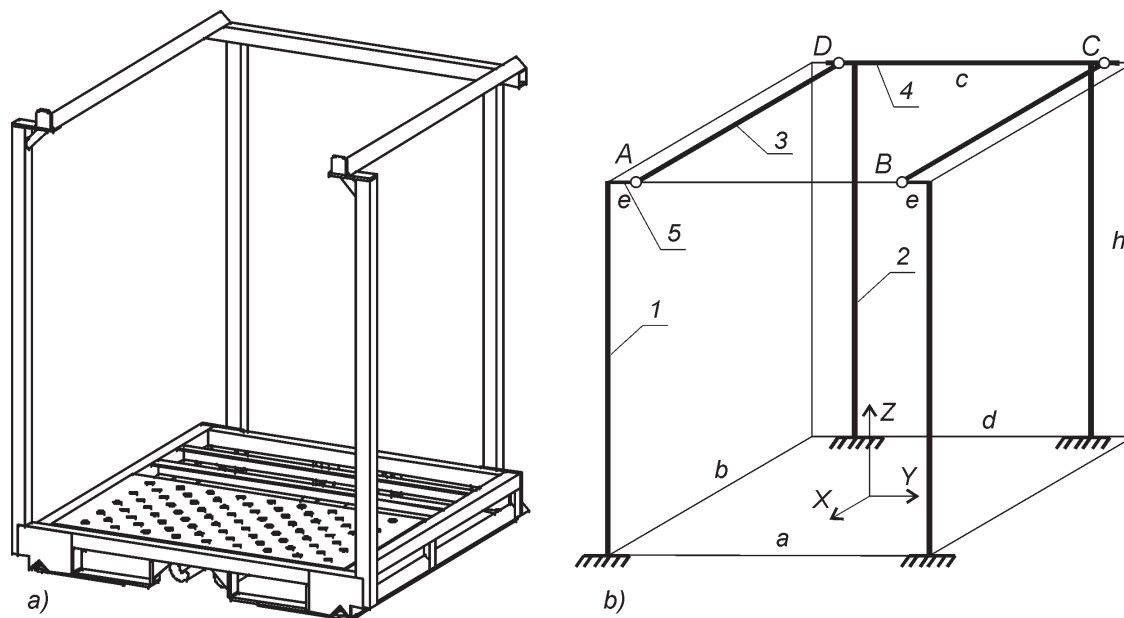
Results and discussion

A post pallet for storing pneumatic types (fig. 2a) is made of a rigid lowermost plate (floor) with a structure which enables lifting and moving the pallet with a forklift truck. Four posts are welded to the plate, with the uppermost part equipped with elements allowing the stacking of identical pallets. The posts are installed to carry the weight of pallets placed in

BADANIA I ROZWÓJ

przeniesienie ciężaru palet położonych wyżej i ochrona miejsca nad płytą, w którym składowane są produkty. Słupki najniższej położonej palety w stosie są narażone na zniszczenie poprzez utratę stateczności, jeżeli stos byłby zbyt wysoki.

the upper locations and to protect the space above the plate where products are stored. The posts of the lowermost pallet in the stack can be damaged due to the loss of stability if the stack is too high.



Rycina 2. Paleta słupkowa do magazynowania opon pneumatycznych: a) – widok ogólny, b) – oznaczenie wymiarów: 1 – słupek przedni, 2 – słupek tylny, 3 – kątownik (łożo dla górnej palety), 4 – poprzecznik, 5 – wspornik

Figure 2. Post pallet designed for storage of pneumatic tires: a) – overall view, b) – specification of dimensions: 1 – front post, 2 – rear post, 3 – angle bar (bed for upper pallet), 4 – cross bar, 5 – cantilever

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Przednie słupki palety są połączone z odpowiadającymi im tylnymi za pomocą przyspawanych poziomych kątowników, na których spoczywa górna paleta. Bez dokładnej analizy nieliniowego zjawiska kontaktu elementów rozkład ich obciążenia jest trudny do przewidzenia. Ponieważ obciążenie to powoduje zginanie kątownika (łoża) względem osi minimalnego momentu bezwładności przekroju, to belka ta może się ugiąć i, z uwagi na sztywną podłogę górnej palety, zasadniczą część obciążenia przejmą najmniej podatne części łoża położone najbliżej słupków. W związku z tym założono, że podłoga górnej palety oddziałuje na dolną w punktach A, B, C i D (ryc. 2b). Przednie słupki nie są u góry ze sobą sztywno połączone, jednak sztywna podłoga górnej palety ogranicza ich wzajemne przemieszczenia. Dlatego w modelu obliczeniowym punkty A i B połączono sztywnym prętem z przegubami na obu końcach (pręt kratownicowy). Stos palet może doznawać przechyłów translacyjnych bocznych w płaszczyźnie (YZ) , w kierunku przód-tył (XZ) , jak również przechyłów skrętnych. Przechyły oznaczono za pomocą czterech liter, np. $ABDC$ oznacza przechył boczny, przy czym punkty A i B oraz D i C przemieszczają się w kierunku wektorów odpowiednio AB i DC . Podobnie $ABCD$ – oznacza przechył skrętny, przy którym punkty A i B przemieszczają się tak jak poprzednio, ale punkty C i D przemieszczają się w przeciwnym kierunku, tj. w kierunku wektora CD . Dlatego dalej rozważano przestrzenny model palety reprezentowany przez słupki sztywno zamocowane

The front posts of the pallet are connected with their corresponding rear posts with welded horizontal angle bars, on which the uppermost pallet is placed. The distribution of their load is difficult to predict without a detailed analysis of non-linear contact between elements. As this load causes the angle bar (bed) to bend against the axis of the minimum moment of inertia of the section, the beam can bend and due to the rigid floor of the uppermost pallet, the main part of the load is carried by the least susceptible parts of the bed closest to the posts. Consequently, it was assumed that the floor of the uppermost pallet impacts the lower one in points A, B, C and D (fig. 2b). The front posts are not rigidly joined together in the uppermost part; however, the rigid floor of the uppermost pallet limits their mutual transitions, so in the computational model points A and B were combined with a rigid rod with pinned joints on both ends (truss rod). Pallet stack can be subject to lateral translational sways in the horizontal plane (YZ) , in the front-rear direction (XZ) and torsional sways. Sways were marked with four letters, e.g. $ABDC$ means lateral sway, with points A and B and C and D moving in the direction of the respective vectors AB and DC . Similarly, $ABCD$ means torsional sway, where points A and B move as in the previous example, but points C and D move in the opposite direction, i.e. towards vector CD . Therefore, the spatial model of the pallet was further considered, represented by posts rigidly attached to the undeformable plate/floor at the bottom and

w nieodkształcalnej płycie/podłodze u dołu, z górnymi końcami połączonymi dwoma kątownikami (łoża), dwoma wspornikami, poprzecznikiem i prętem kratownicowym (ryc. 3a).

Słupki są wykonane ze stali S235 w postaci kształtownika rurowego 50 x 50 x 3 wykończonego na zimno. Pole przekroju poprzecznego jest równe $A = 5,41 \text{ cm}^2$, a wskaźnik plastyczny $W_{pl} = 9,39 \text{ cm}^3$. Jest to przekrój klasy 1. Moduł Younga materiału wynosi $E = 210\,000 \text{ MPa}$.

Na ryc. 2b przedstawiono charakterystyczne wymiary modelu palety. Dane przyjęte do obliczeń zamieszczono w tabelach 1 i 2. Przykładową analizę stateczności stosu przeprowadzono dla $n = 5$ palet załadowanych oponami.

Przyjęto, że współczynnik obciążeń stałych $\gamma_F = 1,2$, zaś współczynnik obciążeń zmiennych (oddziaływanie wózka) $\gamma_Q = 1,5$.

Tabela 1. Wymiary modelu palety

Table 1. Pallet model dimensions

Wymiar/Dimension, [m]							
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>h</i>	<i>e</i>	<i>r_{ah}</i>	<i>r_{bh}</i>
1,25	1,20	1,07	0,93	1,50	0,09	0,50	0,607

r_{ah}, *r_{bh}* – ramiona sił ciężkości względem krawędzi podstawy stosu w płaszczyznach (YZ) i (XZ)/arms of gravity forces against the stack base in planes (YZ) and (XZ)

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Tabela 2. Obciążenia palety

Table 2. Pallet loads

Siła/Force	kN	Opis/Description
G_{w1}	0,96	Ciężar własny palety/Pallet dead weight
G_{L1}	4,41	Ciężar ładunku/Weight of the load
G_1	5,37	Ciężar całkowity palety/Total weight of pallet
G_{1o}	6,45	Ciężar obliczeniowy załadowanej palety/Design weight of loaded pallet
P_{2Ed}	3,22	Siła pionowa działająca na dwa słupki palety od załadowanej jednej palety/Vertical force applied to two pallet posts caused by one loaded pallet
H_p	0,35	Siła pozioma (górną 4-tej palety) od oddziaływania wózka widłowego/ Horizontal force (top of the 4th pallet) caused by the forklift truck
H_{po}	0,53	Siła pozioma obliczeniowa oddziaływania wózka/Design horizontal force cause by the forklift truck

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Wrażliwość układu na efekty drugiego rzędu

Zasadniczy wpływ na podatność stosu palet na przechyły mają słupki, tj. ich wysokość, sposób zamocowania i parametry przekroju poprzecznego. Przyjęto, że słupki są utwierdzone w płycie palety, zaś górne końce mogą się przemieszczać poziomo zgodnie z przesuwem/obrotom podłogi górnej palety. Stąd długość wyboczeniowa $L_{cr} = 2h$.

Smukłość odniesienia $\lambda_1 = \pi \sqrt{E / f_y} = 93,9$, stąd smukłość względna $\bar{\lambda} = (L_{cr} / i_{\min}) / \lambda_1 = 1,69$.

the uppermost ends are bound with two angle bars (beds), two cantilevers and the truss rod (fig. 3a).

Posts are made of steel S235 in the form of a cold-finished 50 x 50 x 3 tubular section. The area of the cross-section $A = 5,41 \text{ cm}^2$, the plasticity indicator $W_{pl} = 9,39 \text{ cm}^3$. This is a class 1 section. Young's modulus of the material $E = 210\,000 \text{ MPa}$.

Fig. 2b presents the characteristic dimensions of the pallet's model. The data used for the calculations are presented in Table 1 and 2. An exemplary analysis of stack stability was conducted for $n = 5$ pallets loaded with tyres.

The assumed value of the permanent load coefficient was $\gamma_F = 1,2$, and the variable load factor (the impact of the forklift truck) – $\gamma_Q = 1,5$.

Structure's sensitivity to second order effects

Posts have a considerable impact on the pallet stack's susceptibility to sways, in particular their height, fastening method and cross-section parameters. It was assumed that posts are attached to the pallet's plate, and the upper ends can move horizontally in line with the shift/rotation of the uppermost pallet's floor. Hence buckling length $L_{cr} = 2h$.

Reference slenderness $\lambda_1 = \pi \sqrt{E / f_y} = 93,9$, hence relative slenderness $\bar{\lambda} = (L_{cr} / i_{\min}) / \lambda_1 = 1,69$.

$F_{cr} = Af_y / \bar{\lambda}^2 = 44,4 \text{ kN}$, $F_{Ed} = 6,45 \text{ kN}$ i na podstawie (1) $a_{cr} = 6,9 < 10$. Stąd wynika, że w analizie rozważanego układu należy uwzględnić efekty drugiego rzędu.

Imperfekcje przechyłowe i łukowe

Wprowadzając wysokość stosu palet $H = 5h$ i liczbę słupków w rzędzie $m = 2$ do (3) na podstawie (2), uzyskano wartość imperfekcji przechyłowej $\phi = 0,0032$. Wartość imperfekcji łukowych jest zależna od krzywej wybożenia przyporządkowanej do typu przekroju kształtownika i typu analizy. W przypadku rury ze stali S235 jest to krzywa c przedstawiona na rys. 6.4 normy [7] (patrz też tablica 5.1 i tablica 6.2 tej normy) i dla analizy plastycznej $e_0 / L = 1/150$.

Na podstawie wartości powyższych parametrów imperfekcji i sumy obliczeniowych sił normalnych występujących w dwóch słupkach każdej palety (N_{iEd}) wyliczono wartości obliczeniowych sił poziomych H_{iEd} działających na dwa słupki każdej z palet stosu: H_{iEd}^p – od imperfekcji przechyłowych, H_{iEd}^l – łukowych i H_{iEd}^w – od oddziaływania wózka. Zestawiono w tabeli 3 siły poziome działające u góry palety o podanym numerze (por. rys. 1c). Ponieważ słupki mają przekrój bisymetryczny i założono dla nich jednakowe warunki brzegowe, to wartości sił podane w tabeli 3 odnoszą się do przechyłu słupków leżących zarówno w płaszczyznach równoległych do (YZ), jak i (XZ).

Tabela 3. Siły poziome działające na dwa słupki palety
Table 3. Horizontal forces applying to two pallet posts

Nr palety/ Pallet No, i	N_{iEd}	H_{iEd}^p	H_{iEd}^l	H_{iEd}^w	H_{iEd}
	kN	kN	kN	kN	kN
5	0,00	0,00	0,00		0,00
4	3,22	0,0102	0,086	0,263	0,359
3	6,45	0,0102	0,258		0,268
2	9,67	0,0102	0,516		0,526
1	12,9	0,0102	0,860		0,870

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

Oddziaływanie wózka widłowego

Na podstawie danych literaturowych [8] dotyczących regałów paletowych przyjęto zalecaną wartość poziomej siły działającej na płytę najwyższej położonej palety. Wartość tej siły podano w tabeli 2.

Nośność najbardziej obciążonego słupka dolnej palety

Element krytyczny stosu palet stanowi najbardziej obciążony słupek występujący w palecie nr 1. Konieczne jest więc normowe sprawdzenie jego bezpieczeństwa, czyli zweryfikowanie,

$F_{cr} = Af_y / \bar{\lambda}^2 = 44,4 \text{ kN}$, $F_{Ed} = 6,45 \text{ kN}$ and on the basis of (1) $a_{cr} = 6,9 < 10$. The above demonstrates that the analysis of the system in question should take into consideration second order effects.

Sway and bow imperfections

By introducing pallet stack height $H = 5h$ and the number of posts in a row $m = 2$ to (3) on the basis of (2), sway imperfection $\phi = 0,0032$ was achieved. Bow imperfections value depends on the buckling curve assigned to the type of the shape's section and the type of analysis. In the case of a pipe made of steel S235 this is curve c presented in fig. 6.4 of the standard [7] (see also table 5.1 and table 6.2 of the standard) and for plastic analysis $e_0 / L = 1/150$.

On the basis of the above parameters of imperfections and the total of design normal forces occurring in two posts of each pallet (N_{iEd}), the values of design horizontal forces acting on two posts of each pallet in the stack H_{iEd} were calculated: H_{iEd}^p – caused by sway imperfections, H_{iEd}^l – bow imperfections and H_{iEd}^w – the impact of the forklift truck. The horizontal forces presented in table 3 act on the uppermost part of the pallet with the specified number (cf. fig. 1c). As the posts have a bisymmetrical section and identical boundary conditions were assumed for them, the values of forces provided in table 3 refer to the sway of posts in planes parallel to (YZ) and in (XZ).

Forklift impact

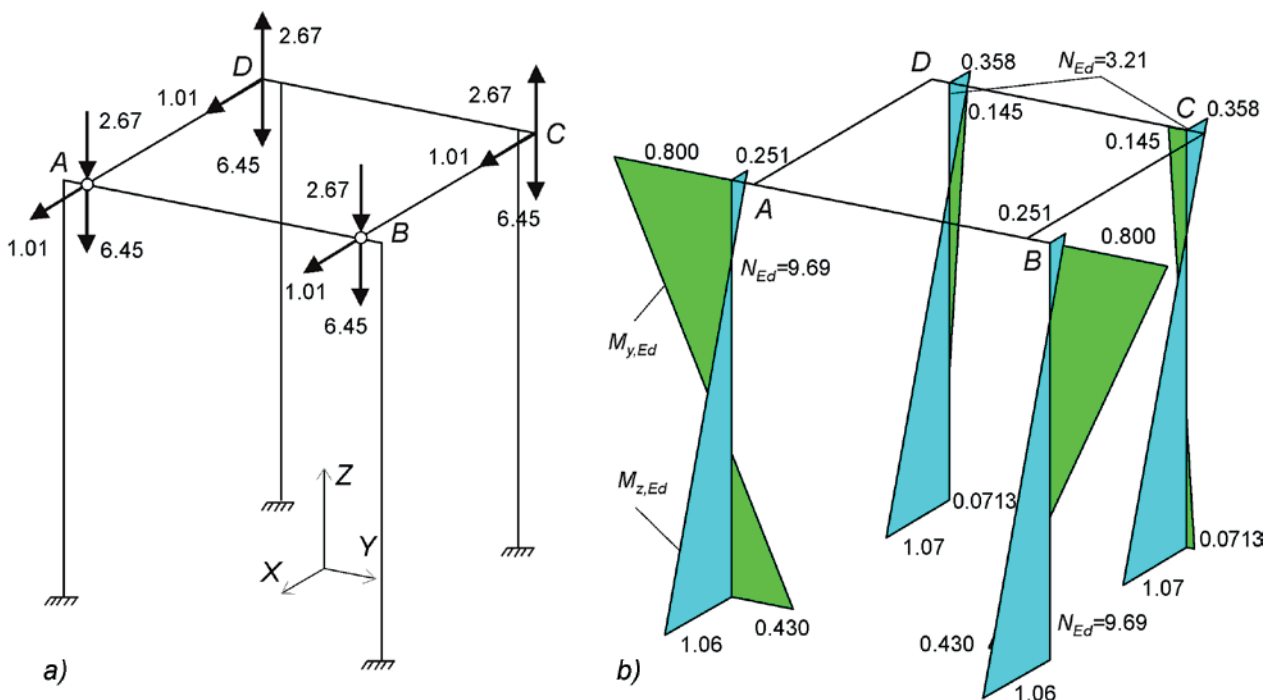
Based on literature data [8] referring to pallet racks, the recommended value of the horizontal force acting on the plate of the highest pallet was assumed. Its value was provided in table 2.

Capacity of the most loaded post of the lowermost pallet

The critical element of the pallet stack is the most loaded post in pallet No. 1. Therefore, it is necessary to carry out a code checking of its safety, i.e. verifying whether under the set loads its load capacity will not be exhausted.

czy pod wpływem zadanych obciążeń jego nośność nie ulegnie wyczerpaniu.

Na stos palet działają pionowe siły ciężaru własnego palet i ciężary ładunków, siły poziome wynikające z imperfekcji oraz siła pozioma oddziaływania wózka widłowego. Siły poziome działające na palety zostały zredukowane do punktów A, B, C , i D dolnej palety (ryc. 3a). W przypadku przechyłu $DACB$ (ryc. 3a) są to pary sił o wartościach $2,67 \text{ kN}$ i ramionach AD , zaś w przypadku przechyłu $ABDC$ mają one wartości $3,01 \text{ kN}$ i ramiona AB . Ponadto we wspomnianych punktach działają siły poziome o wartościach $1,01 \text{ kN}$, jako wynik redukcji sił poziomych i siły pionowe, wynikające z ciężaru palet o numerach 2–5, o wartościach $6,45 \text{ kN}$ każda.



Rycina 3. Dolna paleta: a) – siły działające na paletę (kN), b) – wykresy momentów zginających słupki (kNm) i siły ściskające N_{Ed} w kN

Figure 3. Lowermost pallet: a) – forces applied to the pallet (kN), b) – bending moments diagrams on posts (kNm) and compression forces N_{Ed} in kN

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Metodą elementów skończonych obliczono siły normalne i momenty zginające słupki we wszystkich wariantach przechyłów. Przykładowe wykresy momentów zginających i wartości sił ściskających dla przechyłu $DACB$ przedstawiono na ryc. 3b.

Ze względu na dwukierunkowe zginanie słupków względem obojętnej osi y i z ich przekrojów poprzecznych, należy dla każdego słupka we wszystkich wariantach przechyłu sprawdzić warunki (4) i (5). Poniżej przedstawiono tok postępowania w odniesieniu do słupka B w przechyle $DACB$. Słupek ten jest ściskany siłą $N_{Ed} = 9,69 \text{ kN}$, a największe wartości momentów zginających względem osi y i z odpowiednio wynoszą $M_{y,Ed} = 0,800 \text{ kNm}$ i $M_{z,Ed} = 1,06 \text{ kNm}$. W celu sprawdzenia warunków nośności słupka obliczono wielkości występujące w (4) i (5), tj.:

The pallet stack is influenced by the vertical forces of the pallets' dead weight and the weight of the load, horizontal forces resulting from imperfections and the horizontal force caused by the forklift truck. Horizontal forces acting on the pallets were reduced to points A, B, C and D of the lowermost pallet (fig. 3a). In the case of the $DACB$ sway (fig. 3a) these are pairs of forces with values 2.67 kN and arms AD , while in the case of the $ABDC$ sway they take values 3.01 kN and their arms are AB . Furthermore, horizontal forces with values 1.01 kN act on the mentioned points as a result of a reduction of horizontal forces, and vertical forces caused by the weight of pallets with numbers 2–5 and values 6.45 kN each.

Using the finite element method, normal forces and bending moments for posts were calculated in all sway variants. The exemplary diagrams of bending moments and compression forces for the $DACB$ sway are presented in fig. 3b.

Due to the bidirectional bending of posts against the neutral axes y and z of their cross-sections, for each post in all sway variants, conditions (4) and (5) should be verified. The procedure for post B in the $DACB$ sway will be presented. The post is compressed with force $N_{Ed} = 9.69 \text{ kN}$, and the highest values of bending moments against axes y and z amount respectively to $M_{y,Ed} = 0.800 \text{ kNm}$ and $M_{z,Ed} = 1.06 \text{ kNm}$. In order to verify the conditions for the post's load capacity, values occurring in (4) and (5) were calculated, i.e.:

RESEARCH AND DEVELOPMENT

$$N_{Rk} = Af_y = 127 \text{ kN}, \quad M_{y,Rk} = W_{pl}f_y = 2,01 \text{ kNm},$$

$$\chi_y = 1 / \left(\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2} \right) = 0,26,$$

gdzie

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 2,30$$

Parametr imperfekcji krzywej wyboczenia przyjęto dla kształtownika rurowego wykończony na zimno, tj. $\alpha = 0,49$.

$$k_{yy} = C_{my} \left[1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{\gamma_{M1} N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right] = 0,60,$$

lecz

$$k_{yy} \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{\gamma_{M1} N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right) = 0,51,$$

stąd

$$k_{yy} = 0,51,$$

gdzie: wg (7) $C_{my} = 0,39 \geq 0,4$, czyli $C_{my} = 0,40$, przy

$$\psi = M_{Ed,m} / M_{Ed,w} = -0,430 / 0,800 = -0,54.$$

Podobnie obliczono $C_{mz} = 0,51$ i $k_{zz} = 0,64$, a także $k_{yz} = 0,60$; $k_{zz} = 0,39$ oraz $k_{zy} = 0,60$; $k_{yy} = 0,30$.

Wartości parametrów $\gamma_{M0} = \chi_{LT} = 1,0$ przyjęto zgodnie z zaleceniami normy, zaś wartość współczynnika częściowego związanego ze statecznością słupka $\gamma_{M1} = 1,15$.

Warunki nośności prawego słupka palety wg (4) i (5) przyjmują postać $0,66 \leq 1,0$ i $0,76 \leq 1,0$, a więc są spełnione. Oznacza to, że wg obowiązujących przepisów normowych, słupki B dolnej palety, ze względu na niebezpieczeństwo przechyłu DACB stosu, będzie bezpiecznie przenosił obciążenia przy spiętrzeniu w stos pięciu palet.

$$N_{Rk} = Af_y = 127 \text{ kN}, \quad M_{y,Rk} = W_{pl}f_y = 2,01 \text{ kNm},$$

$$\chi_y = 1 / \left(\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2} \right) = 0,26,$$

where

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 2,30$$

The imperfection parameter for the buckling curve was assumed for the cold-finished tubular section, i.e. $\alpha = 0,49$.

$$k_{yy} = C_{my} \left[1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{\gamma_{M1} N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right] = 0,60,$$

but

$$k_{yy} \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{\gamma_{M1} N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right) = 0,51,$$

hence

$$k_{yy} = 0,51,$$

where: according to (7) $C_{my} = 0,39 \geq 0,4$, so $C_{my} = 0,40$, with

$$\psi = M_{Ed,m} / M_{Ed,w} = -0,430 / 0,800 = -0,54.$$

Similarly, the following calculations were carried out: $C_{mz} = 0,51$ and $k_{zz} = 0,64$, and also $k_{yz} = 0,60$; $k_{zz} = 0,39$ and $k_{zy} = 0,60$; $k_{yy} = 0,30$.

Values of parameters $\gamma_{M0} = \chi_{LT} = 1,0$ were adopted in accordance with the standard, and the value of the partial coefficient associated with post's stability $\gamma_{M1} = 1,15$.

The conditions of the pallet post's load capacity according to (4) and (5) take the form of $0,66 \leq 1,0$ and $0,76 \leq 1,0$, i.e. they are met. This means that based on the current code regulations, post B of the lowermost pallet due to the risk of the DACB sway of the stack will safely carry loads with the stacking of five pallets.

Tabela 4. Wartości lewych stron w warunkach nośności słupków palety

Table 4. Values of the left side of the load capacity conditions for pallet posts

Słupek/Post	Wariant przechyłu/ Sway case									
	DACB		ABDC		ADCB		ADCB		ABCD	
	Wg/By (4)	Wg/By (5)	Wg/By (4)	Wg/By (5)	Wg/By (4)	Wg/By (5)	Wg/By (4)	Wg/By (5)	Wg/By (4)	Wg/By (5)
A	0,66	0,76	0,44	0,33	0,32	0,43	0,42	0,41	0,31	0,29
B	0,66	0,76	0,68	0,56	0,32	0,43	0,52	0,57	0,60	0,54
C	0,30	0,41	0,63	0,55	0,59	0,70	0,22	0,26	0,25	0,21
D	0,30	0,41	0,30	0,21	0,59	0,70	0,48	0,52	0,53	0,50

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

W podobny sposób należy sprawdzić warunki nośności pozostałych nóg dolnej palety.

Wyniki pełnego sprawdzenia dla rozważanej palety zestawiono w tabeli 4.

Należy podkreślić, że następujące warianty są równoważne ze względu na warunki nośności: BACD i ABDC, DABC i ADCB oraz BADC i ABCD, i nie zostały one ujęte w tabeli 4.

The conditions of the load-carrying capacity of the remaining legs of the lowermost pallet should be verified in a similar way.

The results of a complete verification for the pallet in question were presented in table 4.

It should be emphasised that the following variants are equivalent with regard to load capacity conditions: BACD and ABDC, DABC and ADCB, and also BADC and ABCD, and these were not included in table 4.

W rozważanym przypadku żadna wartość lewej strony warunku nośności (4) ani warunku (5) nie przekracza jedności, co oznacza, że słupki dolnej palety mogą bezpiecznie przenosić przewidywane obciążenia.

Statyczna równowaga stosu palet

Spełnienie warunku nośności najbardziej obciążonego słupka dolnej palety nie gwarantuje jeszcze bezpieczeństwa stosu palet, gdyż stos jako całość może wywrócić się pod działaniem sił poziomych wynikających z imperfekcji i oddziaływania wózka widłowego. Zakłada się przy tym istnienie tarcia palety dolnej o podłoże. Konieczne jest sprawdzenie warunku równowagi statycznej stosu wg (8). Z analizy budowy dolnej części palety spoczywającej na posadzce wynika, że obrót stosu mógłby nastąpić wokół krawędzi K odległej od linii działania siły ciężkości stosu r_{ah} . Moment wywracający stos wynosi:

$$M_{K,Ed} = 1,1 \sum_{i=1}^5 H_{ki} i h + 1,5(n-1)h \frac{1}{2} H_p = 5,884 \text{ kNm},$$

gdzie: H_{ki} – siły charakterystyczne od imperfekcji, bez oddziaływania wózka, zaś moment ustabilizujący stos $M_{K,Rd} = 0,9nG_t r_{ah} = 12,09 \text{ kNm}$.

Zgodnie z (8) warunek równowagi statycznej stosu przyjmuje postać: $0,49 < 1,0$, czyli jest spełniony. Oznacza to, że nie istnieje niebezpieczeństwo wywrócenia się stosu pięciu załadowanych palet. Ponieważ w przypadku rozważanej palety odległość r_{bh} krawędzi palety od linii działania siły ciężkości stosu jest większa niż r_{ah} , nie sprawdzano warunku równowagi statycznej stosu w płaszczyźnie (XZ).

Podsumowanie

Zaproponowany sposób oceny bezpieczeństwa składowania palet spiętrzanych w stosy bazuje na dostępnych, aktualnie obowiązujących w Unii Europejskiej uregulowaniach normatywnych dotyczących konstrukcji stalowych. Potraktowanie stosu palet jako konstrukcji wielokondygnacyjnej niestężonej, dzięki wspomnianym przepisom normowym, umożliwi wyznaczenie sił poziomych, które działają na stos i wynikają z niedoskonałości przechyłowych i łukowych. W analizie uwzględniono również wpływ oddziaływania wózka widłowego na stateczność stosu.

Przedstawiony sposób oceny bezpieczeństwa stosu wymaga sprawdzenia warunków nośności wszystkich najbardziej wyężonych słupków, tj słupków dolnej palety. Analiza powinna uwzględniać wszystkie przypadki możliwych przechyłów oraz warunek równowagi statycznej stosu. W przedstawionej przykładowej ocenie bezpieczeństwa stosu złożonego z pięciu załadowanych palet zaprojektowanych do składowania opon pneumatycznych wykazano, że spełnione są normowe warunki nośności słupków dolnej palety stosu oraz warunek równowagi statycznej całego stosu.

In the considered case none of the values of the left side of the load capacity condition (4) or condition (5) is higher than one, which means that the lowermost pallet posts can safely carry the expected loads.

Static equilibrium of the pallet stack

Meeting the load capacity conditions of the most loaded post of the lowermost pallet does not guarantee the safety of the pallet stack, as the stack as a whole can overturn as a result of horizontal forces resulting from imperfections and the impact of the forklift truck. The existence of friction of the lowermost pallet against the floor is also assumed. It is necessary to verify the condition of the static equilibrium of the stack according to (8). The analysis of the structure of the lowermost part of the pallet placed on the floor shows that the rotation of the stack could occur along edge K distant from the line of action of the gravity force of the stack r_{ah} . The moment overturning the stack is:

$$M_{K,Ed} = 1,1 \sum_{i=1}^5 H_{ki} i h + 1,5(n-1)h \frac{1}{2} H_p = 5,884 \text{ kNm},$$

where: H_{ki} – characteristic forces caused by imperfections, without the impact of the forklift truck, with the moment stabilising the stack $M_{K,Rd} = 0,9nG_t r_{ah} = 12,09 \text{ kNm}$.

In line with (8) the condition of the stack's static equilibrium takes the form $0,49 < 1,0$, i.e. it is met, which means that there is no risk of overturning a stack of five loaded pallets. As in the case of the considered pallet the distance between the pallet edge r_{bh} and the line of action of the gravity force of the stack is higher than r_{ah} , so the condition of the static equilibrium of the stack in plane (XZ) was not verified.

Summary

The proposed safety assessment procedure for storing stacked pallets is based on the available regulations currently binding in the European Union and standards concerning steel constructions. Treating a pallet stack as a multistorey structure without bracings, due to the mentioned standards, makes it possible to determine horizontal forces acting on the stack resulting from sway and bow imperfections. The analysis also included the impact of the lift on the stack's stability.

The presented method of safety assessment requires the verification of the load capacity conditions of all the most stressed posts, i.e. posts of the lowermost pallet, in all cases of possible sways, and the condition of the static equilibrium of the stack. In the presented exemplary analysis of the safety of the stack consisting of five loaded pallets designed to store pneumatic tyres it was demonstrated that the load capacity conditions of the lowermost pallet's posts specified in the relevant standards are met, as well as the condition of the static equilibrium of the stack.

Literatura / Literature

- [1] Bernuzzi C., Gobetti A., Gabbianelli G., Simoncelli M., *Unbraced pallet rack design in accordance with European practice. Part 1: Selection of the method of analysis*, "Thin Walled Structures" 2015, 86, 185–207.
- [2] Bernuzzi C., Gobetti A., Gabbianelli G., Simoncelli M., *Unbraced pallet rack design in accordance with European practice. Part 2: Essential verification checks*, "Thin Walled Structures" 2015, 86, 208–229.
- [3] Shah S.N.R., Sulong N.H. Ramli, Jumaat M.Z., Shariati M., *State-of-the-art review on the design and performance of steel pallet rack connections*, "Engineering Failure Analysis" 2016, 66(8), 240–258.
- [4] Wolny S., Ładecki B., Matachowski F., *Designing folding wall box pallets*, "Mechanics and Control" 2014, 33(1), 37–41.
- [5] PN-M-78207:1981 Palety ładunkowe słupkowe metalowe. Parametry podstawowe.
- [6] PN-M-78205:1988 Palety ładunkowe metalowe. Wspólne wymagania i badania.
- [7] PN-EN 1993-1-1:2006 Projektowanie konstrukcji stalowych. Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [8] Tilburgs Cees J., *Regały dla poprawnie użytkowanych wózków (Cz. 1)*, „Logistyka” 2001, 1, 33–40.

DR HAB. INŻ. JÓZEF PELC – absolwent Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Aktualnie jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Wydziału Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, obecnie na stanowisku profesora nadzwyczajnego. Zajmuje się zagadnieniami wytrzymałości konstrukcji inżynierskich i metodami komputerowymi mechaniki ciał odkształcalnych, w szczególności analizą bezpieczeństwa wytrzymałościowego wielkich konstrukcji kratownicowych.

JÓZEF PELC, PH.D. ENG. – graduate of the Faculty of Civil Engineering at the Warsaw University of Technology. He is currently a member of the scientific and teaching staff at the Faculty of Technical Sciences of the University of Warmia and Mazury in Olsztyn, holding the post of the university professor. He deals with issues related to the resistance of engineering structures and computer methods of deformable body mechanics, in particular the strength analysis of large truss structures.



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

Artykuł został przetłumaczony ze środków MNiSW w ramach zadania: Stworzenie angielskich wersji oryginalnych artykułów naukowych wydawanych w kwartalniku „BiTP. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza” – typ zadania: stworzenie angielskich wersji wydawanych publikacji finansowane w ramach umowy 935/P-DUN/2016 ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na działalność upowszechniającą naukę.