

Projektowanie ekologicznych konstrukcji stalowych

Marek Miczko – student, dr inż. hab. Jan Zamorowski, prof. uczelni,
Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

1. Wprowadzenie

Ekologiczne projektowanie obiektów budowlanych to takie, które w jak największym stopniu minimalizuje jego negatywny wpływ na środowisko naturalne. Wznoszenie, użytkowanie oraz rozbiórka obiektów są związane ze zużyciem energii, wody oraz emisją zanieczyszczeń stałych, ciekłych i gazowych. Według Komisji Europejskiej użytkowanie budynków generuje 40% całkowitego zużycia energii w Unii Europejskiej oraz jest odpowiedzialne za 36% emisji gazów cieplarnianych [M4]. Powoduje to coraz większą degradację środowiska naturalnego.

Podejście projektowe musi zostać uzupełnione o nowy czynnik. Oprócz aspektów takich jak: przeznaczenie obiektu, koszt budowy i użytkowania, czas wybudowania należy brać pod uwagę wpływ obiektu na środowisko naturalne, co jest zgodne z ideą zrównoważonego budownictwa, a w ogólnym ujęciu z ideą zrównoważonego rozwoju. Idea ta integruje w sobie trzy aspekty: ekonomiczny, społeczny oraz środowiskowy (rys. 1).



Rys. 1. Trzy aspekty tworzące obszar zrównoważonego rozwoju [M9]

Wprowadza ona równowagę pomiędzy dążeniem do zadowalającego efektu ekonomicznego a dbaniem o środowisko naturalne i otoczenie społeczne. Podstawy instytucjonalne zrównoważonego rozwoju zostały przyjęte na konferencji ONZ w Rio de Janeiro w 1992 roku. Opracowano wtedy dokument Agenda 21, który zawierał plan działania w zakresie wdrażania strategii zrównoważonego rozwoju przez rządy państw i grupy społeczne [5]. W zakresie

ekologicznym polega ona na projektowaniu i wznoszeniu obiektu, z uwzględnieniem jego oddziaływania na środowisko oraz na oszczędnym gospodarowaniu zasobami naturalnymi przez cały okres jego użytkowania. Obiekty budowlane, które powstają zgodnie z tą koncepcją, powinny się charakteryzować trwałością, małym zapotrzebowaniem na energię i zredukowaną emisją zanieczyszczeń w czasie ich użytkowania oraz możliwością ponownego użycia materiałów po rozbiórce. Takimi właściwościami charakteryzują się budynki o konstrukcji stalowej.

2. Zrównoważony rozwój w ujęciu normowym

Narzędziem do oceny użytych w budownictwie materiałów, technologii oraz procesów pod kątem zrównoważonego rozwoju w Unii Europejskiej są odpowiednie normy. Opracowaniem tych norm zajmuje się komitet techniczny CEN/TC 350 – Sustainability of construction Works. W Polsce jego odpowiednikiem jest PKN/KT 307 ds. Zrównoważonego Budownictwa. Normy dostarczają ilościowy sposób oceny zrównoważoności wraz z jednostkami miary, ale bez ocen wartościujących. Wartości wymagane powinny wynikać ze specyfikacji inwestora lub przepisów krajowych. Oceny dotyczą każdego z aspektów zrównoważonego rozwoju: środowiskowego, społecznego oraz ekonomicznego.

Do oceny środowiskowej przewidziano poniższy zestaw norm.

- **Ramy metodyczne**

- PN-EN 15643-1:2011: Zrównoważoność obiektów budowlanych – Ocena zrównoważoności – Część 1: Zasady ogólne;
- PN-EN 15643-2:2011 Zrównoważone obiekty budowlane – Ocena budynków – Część 2: Zasady oceny właściwości środowiskowych.

- **Poziom budynku**

- PN-EN 15978:2012 Zrównoważone obiekty budowlane – Ocena środowiskowych właściwości użytkowych budynków – Metoda obliczania.

- **Poziom wyrobu**

- PN-EN 15804+A2:2020-03 Zrównoważenie robót budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych.

Oceny właściwości środowiskowych obiektów budowlanych należy przeprowadzić, mając na uwadze cały cykl życia tych obiektów. W tym celu stosuje się metodę LCA (ang. *Life Cycle Assessment*), czyli „ocenę cyklu życia”.

LCA pozwala ocenić negatywny i pozytywny wpływ na środowisko poprzez analizę zużycia zasobów naturalnych i emisję zanieczyszczeń.

3. Analiza LCA

3.1. Charakterystyka metody

Metoda jest opisana w normach:

- PN-EN ISO 14040:2009 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura;
- PN-EN ISO 14044:2009 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne.

Analiza LCA składa się z poniższych czterech etapów.

- **Definicja celu i zakresu badania**

Definiuje się funkcję i zastosowanie obiektu, czas jego istnienia – począwszy od wydobycia surowców, a skończywszy na rozbiórce i poddaniu odpadów recyklingowi lub na ponownym ich użyciu. Określa się również jednostkę funkcjonalną, granice systemu. Dokonuje się wyboru metody gromadzenia i oceny danych.

- **Analiza zbioru wejść i wyjść LCI**

Obejmuje zdefiniowanie zbioru tego, co wpływa do systemu w postaci zasobów naturalnych, energii oraz tego, co wychodzi w postaci: zanieczyszczeń gruntu, powietrza i wody.

- **Ocena wpływu cyklu życia LCIA**

To najważniejszy z etapów. Na tym etapie następuje przyporządkowanie zebranych danych w poprzednim etapie do konkretnych oddziaływań na środowisko. Do oddziaływań tych zalicza się potencjały: tworzenia efektu cieplarnianego, niszczenia ozonu, fotochemicznego tworzenia ozonu, zakwaszenia, eutrofizacji (nadmiernego nawożenia) gleb i wód, a także toksyczność i wyczerpywanie się zasobów naturalnych.

- **Interpretacja**

W ostatnim etapie, w którym formułuje się wnioski z przeprowadzonej analizy, określa się, jaki element wyrobu lub usługi ma najbardziej szkodliwy wpływ na środowisko oraz podaje możliwe sposoby jego zminimalizowania.

3.2. Zastosowanie koncepcji metody LCA w ekologicznym projektowaniu budynków stalowych

Analiza LCA jest interdyscyplinarnym narzędziem do kompleksowego określania oddziaływania na środowisko. W metodzie tej stosuje się podejście „od kołyski do grobu” (z ang. *from cradle to grave*). Cykl życia obiektu można podzielić na cztery podstawowe etapy:

- wyrobu (wydobycie surowców, transport, przetworzenie surowców, wytworzenie półproduktów i prefabrykatów),
- budowy (transport, montaż obiektu budowlanego na placu budowy),
- użytkowania (eksploatacja, utrzymanie, naprawy, wymiana elementów, renowacja, zużycie energii i wody),
- końca życia (rozbiórka, recykling oraz utylizacja odpadów).

Proces ekologicznego projektowania stalowego obiektu wymaga takiego całościowego podejścia, jakie stosuje się w analizie LCA. Mimo że proces projektowy nie jest bezpośrednią częścią cyklu życia obiektu, decyzje projektowe przekładają się na negatywny lub pozytywny wpływ oddziaływania obiektu na środowisko naturalne na każdym etapie jego istnienia.

4. Wielokryterialne systemy oceny środowiskowej budynków

Do oceny stopnia, w jakim budynki spełniają kryteria zrównoważonego budownictwa, stosowane są opracowywane na całym świecie wielokryterialne systemy oceny środowiskowej. Są w nich oceniane zarówno budynki nowe, jak i istniejące. Systemy takie składają się z kryteriów i subkryteriów, według których oceniany jest budynek w określonej skali punktowej. Ze względu na zróżnicowanie wartości kryteriów w poszczególnych systemach dobra ocena budynku w jednym systemie nie gwarantuje dobrego wyniku w innym systemie.

Zastosowanie na etapie projektowania systemu wielokryterialnej oceny ekologicznej zazwyczaj podnosi koszty budowy, lecz zmniejsza późniejsze koszty eksploatacyjne. Z roku na rok zwiększa się zainteresowanie inwestorów tym, czy budynek ma certyfikat w najbardziej prestiżowych systemach. Do znanych i mających również największy udział na polskim rynku systemów należą brytyjski BREEAM oraz amerykański LEED. Amerykański LEED jest systemem, który ocenia budynki pod kątem takich parametrów jak: oszczędność energii, racjonalne zużycie wody, zmniejszenie emisji CO₂, poprawa jakości środowiska wewnątrz pomieszczeń oraz zarządzanie zasobami. BREEAM był pierwszym tego typu systemem certyfikującym na świecie. Ma on największy udział w europejskim rynku certyfikacji ekologicznej, sięgający poziomu 80%. Jest również najpopularniejszy w Polsce. Jego przewagą w porównaniu z LEED jest lepsza kompatybilność z lokalnymi warunkami atmosferycznymi oraz legislacyjnymi [M7].

W Polsce jest już 1100 certyfikowanych obiektów budowlanych w różnych systemach [M8].

5. Stal jako materiał konstrukcyjny

Stal w porównaniu z innymi konstrukcyjnymi materiałami budowlanymi, takimi jak: beton, drewno, ceramika i gazobetonowe elementy murowe wymaga zużycia największej ilości energii pierwotnej na kg przy jej produkcji. W przypadku stali zużycie energii wynosi 27,5 MJ/kg, dla betonu 0,6 MJ/kg, dla drewna 1,8 MJ/kg [1]. Wydaje się, że już na etapie wyboru głównego materiału konstrukcyjnego stal jako materiał ekologiczny jest najgorszą opcją. Ilość energii wbudowanej w obiekt o konstrukcji stalowej może być większa niż w obiektach o innej konstrukcji, co zależy

również od sumarycznej masy zużytych materiałów. Jej udział w całkowitym zużyciu energii w czasie istnienia obiektu jest mało znaczący. Przykładowo dla wielopiętrowego budynku stalowego w 50-letnim okresie istnienia, energia użyta do produkcji wbudowanych komponentów stalowych stanowi niespełna 2–3% totalnego zużycia energii [2, 3]. Przyczyniają się do tego inne cechy stali jako materiału konstrukcyjnego. Stal ma najkorzystniejszy stosunek wytrzymałości do ciężaru spośród wszystkich materiałów stosowanych w budownictwie. Dzięki temu konstrukcje stalowe charakteryzują się niskim ciężarem. Ogranicza to ilość potrzebnych transportów na plac budowy. Możliwe jest konstruowanie ustrojów o dużej rozpiętości przy ich niedużej wysokości przekrojów elementów. Lżejsza konstrukcja nie potrzebuje dużych fundamentów, przez co zmienia się ilość robót ziemnych. Elementy konstrukcji stalowej są prefabrykowane w wytwórni, skąd są przewożone na plac budowy, gdzie są montowane. Proces wytwarzania elementów prefabrykowanych różni się od tradycyjnego procesu budowlanego. Jest dużo bardziej zoptymalizowany, generuje mniejsze ilości odpadów produkcyjnych. Sam montaż prefabrykowanej konstrukcji jest szybki i charakteryzuje się minimalną ilością pozostawionych odpadów. Dzięki temu, że stal jest materiałem, który można wielokrotnie przetwarzać, odpady te nie generują problemu z ich utylizacją. Poziom efektywności recyklingu w przypadku konstrukcji stalowych sięga 95% [2].

Przemysł stalowy charakteryzuje się wysoką ekoświadomością. Poprzez ciągłe wprowadzanie ulepszeń osiągnięto dużą efektywność w zużyciu energii oraz surowców. Dla przykładu niemiecki przemysł stalowy od roku 1960 zmniejszył konsumpcję energii o 38%, emisję CO₂ o 44%, zużycie wody o połowę oraz emisję pyłów o 90%. Produkty uboczne procesu wytwarzania stali są zużywane niemal całkowicie. Żużel jest wykorzystywany w produkcji cementu, a wytwarzane gazy są używane powtórnie jako źródło energii. Inne produkty uboczne, takie jak: benzen, siarka i smoła są używane w innych gałęziach przemysłu [4]. Działania na rzecz zredukowania negatywnego wpływu na środowisko w czasie produkcji stali są ciągle kontynuowane. ArcelorMittal, największy producent stali na świecie, ograniczył od początku swojej działalności w Polsce (2004 r.) emisję CO₂ o 58%, a pyłów o 82% [M3]. Plan ArcelorMittal na przyszłość dla całej Europy przewiduje ograniczenie emisji dwutlenku węgla o 30% do 2030 roku oraz osiągnięcie neutralności węglowej do 2050 roku w swojej działalności [M1].

6. Narzędzia i technologie wspomagające ekologiczne projektowanie

6.1. Użycie technologii BIM

BIM to technologia, której celem jest modelowanie informacji o budynku, przez cały okres jego istnienia. Jednym



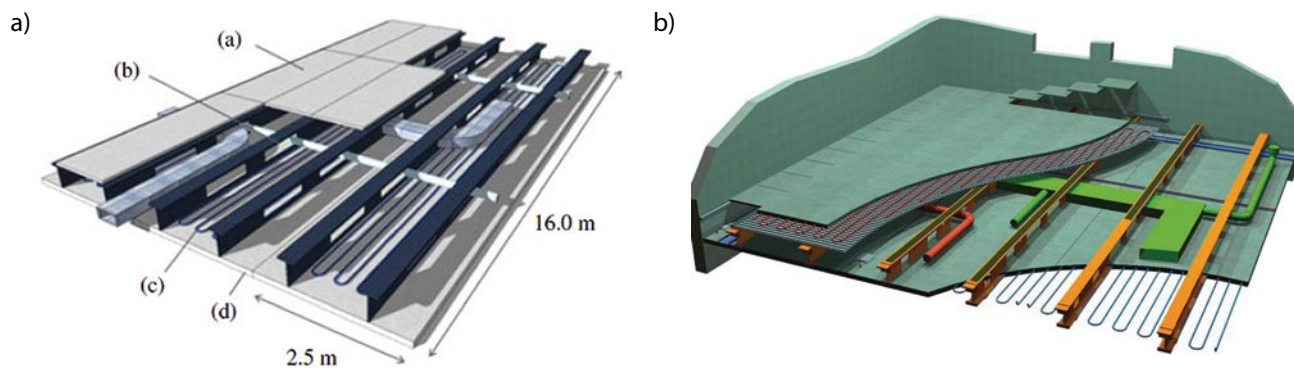
Rys. 2. Zadaszenie dworca głównego w Wiedniu [M6]

z elementów jest trójwymiarowa wizualizacja konstrukcji, stworzona jeszcze na etapie koncepcji projektowych. Umożliwia to w realny sposób ocenić wykonanie konstrukcji przy założonych kosztach, czasie i zużyciu materiałów. W wyniku czego projekt staje się bardziej efektywny ze względu na zużycie energii i zasobów naturalnych. BIM integruje na etapie projektowania specjalistów wszystkich branż: technologa, architekta, konstruktora oraz projektantów instalacji. Dzięki takiemu systemowi pracy oraz wizualizacji w 3D jest możliwe zlokalizowanie potencjalnych kolizji między elementami konstrukcyjnymi i instalacjami oraz ciągami technologicznymi. Skutkuje to zaoszczędzeniem materiału i czasu w fazie wznoszenia obiektu.

Przykładem użycia technologii BIM w praktyce było zaprojektowanie i wykonanie zadaszenia dworca kolejowego w Wiedniu, które składa się z 14 kratownic w kształcie diamentu. Każda z tych kratownic, o długości 76 m, tworzy unikalną strukturę usytuowaną 15 m nad peronem, w której każdy element jest inny oraz żaden nie jest położony poziomo. Dzięki integracji pracy dziesięciu projektantów w programie do modelowania BIM stworzono dokumentację potrzebną do wykonania konstrukcji w wytwórni. Ponadto model BIM zawierał dokładne informacje o położeniu prefabrykowanych elementów. Dane te przetransferowano do tachimetru, za pomocą którego wyznaczono osie konstrukcji i precyzyjnie wypozycjonowano oraz zmontowano elementy [4]. Pozwoliło to na efektywną realizację projektu.

6.2. Stale o wysokiej wytrzymałości

Produkcja stali jest procesem, w którym zużywane są duże ilości energii. Z tego względu projektując konstrukcje stalowe, należy brać pod uwagę jej masę. Można zredukować masę konstrukcji od 10 do 15%, stosując stale gatunków S355, S420 i S460 [6]. Produkowane i stosowane są jeszcze stale o wyższej granicy plastyczności. Gatunek S355 nie jest już według dzisiejszych standardów uznawany za stal wysokiej wytrzymałości. Norma PN-EN 1993 1-1 obejmuje projektowanie konstrukcji budowlanych ze stali o granicy plastyczności od 235 do 460 MPa, a do 700 MPa zakres ten rozszerza norma PN-EN 1993-1-12. Mniejsza masa konstrukcji pozwala



Rys. 3. Systemy stropowo-podłogowe: a) system InaDeck, demontowalne panele podłogowe (a), duże wycięcia w środnikach (b), zintegrowane przewody chłodzące (c), żelbetowa płyta (d) [6], b) system podłogowy Slimline z chłodzonym sufitem i podgrzewaną podłogą, opartą na stalowych profilach płytą żelbetową oraz zdejmowanymi wzdłuż ścian panelami umożliwiającymi dostęp do przestrzeni z instalacjami [4]

zmniejszyć wymiary fundamentów oraz koszty transportu i montażu. Wszystko to przekłada się na zmniejszenie produkcji i emisji dwutlenku węgla i ma korzystny wpływ na środowisko naturalne.

Ciągłość stali o podwyższonej wytrzymałości jest prawie dwukrotnie mniejsza od ciągłości stali zwykłych, co może mieć niekorzystny wpływ np. przy projektowaniu w zakresie sprężysto-plastycznym. Przekroje ze stali o wysokiej wytrzymałości są smuklejsze i przez to są bardziej narażone na utratę stateczności. Ponadto zmniejszenie masy konstrukcji może skutkować większymi przemieszczeniami oraz amplitudami drgań. Projektując konstrukcję ze stali o wysokiej wytrzymałości, należy przyjąć takie rozwiązania konstrukcyjne, które zminimalizują te niedogodności.

Najbardziej efektywne wykorzystanie stali wysokiej wytrzymałości uzyskuje się dla elementów rozciąganych. W przypadku elementów ściskanych stal wysokiej wytrzymałości jest efektywna jedynie dla elementów o małej smukłości, takich jak słupy w budynkach wielokondygnacyjnych, gdzie długość wybozeniowa jest równa typowej wysokości kondygnacji i wynosi 3–4 m. Przykładowo dla dwuprzegubowego słupa o wysokości 3,5 m zwiększenie granicy plastyczności stali z 355 do 460 MPa pozwoliło na zmianę przekroju z HEB 320 na HEA 300. Uzyskano dzięki temu obniżenie ciężaru elementu o 30% [6].

6.3. Rozwiązania belek stropowych w budynkach wielopiętrowych

Do efektywnych ekologicznie rozwiązań można zaliczyć multifunkcyjne systemy stropowe, takie jak InaDeck oraz Slimline (rys. 3). Składają się one ze stalowych belek zespolonych z żelbetową płytą. Ich rozpiętość sięga do 18 m, co pozwala na kreowanie dużych przestrzeni bez słupów. Otwory w stalowych belkach umożliwiają na swobodne prowadzenie instalacji w stropie. Redukuje się w ten sposób wysokość kondygnacji i budynku. System wyposażony jest w zintegrowaną instalację, która służy zarówno do ogrzewania, jak i chłodzenia powietrza wewnątrz budynku. Ciężar własny stropu w systemie Slimline wynosi 300–350 kg/m²,

co stanowi połowę ciężaru odpowiadającego mu stropu w tradycyjnej technologii żelbetowej. Pozwala to zaprojektować mniejsze fundamenty. System składa się z prefabrykowanych elementów, ogranicza to ilość odpadów oraz ryzyko popełnienia błędów na budowie. Dzięki temu oszczędzana jest energia i zasoby naturalne oraz zmniejsza się emisja dwutlenku węgla.

6.4. Projektowanie z myślą o dekonstrukcji

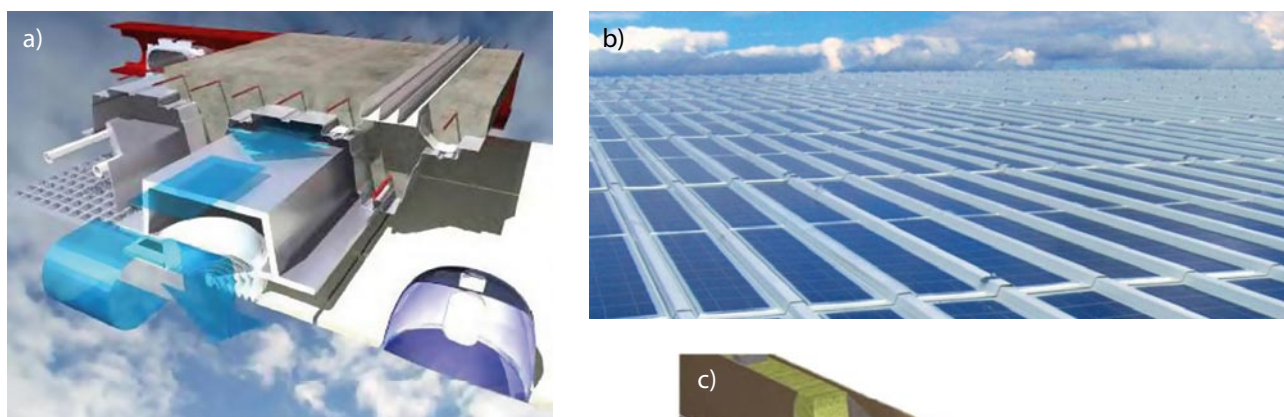
Zasada ta polega na uwzględnieniu, tego co będzie się działo z budynkiem, gdy skończy się jego czas użytkowania. Już w czasie projektowania należy uwzględnić możliwość łatwej rozbiórki obiektu, w celu ponownego wykorzystania jego elementów w innej konstrukcji lub poddania ich recyklingowi. Należy również stosować zasadę, by elementy, które wymagają konserwacji lub wymiany nie były zabudowane konstrukcją o dłuższym okresie trwałości.

Główne zasady projektowania oraz użytkowania obiektu z myślą o dekonstrukcji to [2]:

- używanie standardowej siatki słupów oraz wysokości między kondygnacjami,
- połączenia powinny być łatwe do rozmontowania,
- używanie połączeń skręcanych w miejscu spawanych,
- stosowanie długich belek umożliwiających ich ponowne zastosowanie w innym miejscu,
- zapewnienie łatwego i stałego dostępu do połączeń,
- zapobieganie korozji elementów stalowych przez regularne kontrole.

7. Przykłady innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych poprawiających efektywność energetyczną

Efektywność w zużyciu energii w czasie eksploatacji obiektu można osiągnąć, stosując nowe innowacyjne rozwiązania, takie jak: chłodzone powietrzem lub wodą stropy (rys. 4a), wykorzystanie bezwładności cieplnej płyt zespolonych, stosowanie dachów i fasad z podwójną obudową i szczelną wentylacyjną, zintegrowane z obudową dachu systemy



Rys. 4. Innowacyjne rozwiązania: a) wykorzystanie przestrzeni między żebrami płyty zespolonej do przepływu powietrza [M5], b) system fotowoltaiczny [M2], c) minimalizacja wpływu mostków cieplnych na słupkach ścian zewnętrznych [M5]

fotowoltaiczne i powietrzne wykorzystujące energię słoneczną (rys. 4b), prefabrykowane panele ściennie z izolacją oraz specjalnie perforowanymi słupkami ograniczającymi efekt mostków cieplnych (rys. 4c).

8. Podsumowanie

Stal jest materiałem konstrukcyjnym, przy którego produkcji zużywana jest największa ilość energii na kilogram masy. Jednak dzięki swoim właściwościom mechanicznym i możliwości jej wielokrotnego przetwarzania bez utraty jakości możliwe jest projektowanie z niej obiektów, które są przyjazne środowisku. Kluczem do takiego projektowania jest podejście uwzględniające każdy z etapów istnienia budynku. Pomocne w tym jest przeprowadzenie analizy cyklu życia budynku już na etapie projektowym, która pozwoli ocenić jego wpływ na środowisko. Potwierdzeniem tego, czy proces projektowania ekologicznego można uznać za sukces, będzie uzyskanie najlepszej oceny w jednym z wielokryterialnych systemów oceny środowiskowej. Nie zawsze projektowanie ekologiczne jest jednocześnie ekonomiczne. Można uznać, że te rozwiązania, które zmniejszają zużycie energii oraz oferują korzystanie z odnawialnych jej źródeł, zmniejszą koszty w czasie użytkowania obiektu. Z kolei rozwiązania odnoszące się do fazy projektowania konstrukcji oraz fazy końca życia obiektu nie zawsze będą najtańsze. Kierując się jednak filozofią zrównoważonego rozwoju powinno się mieć na uwadze to, że w lepszym stanie zostawimy otaczające nas środowisko naturalne dla przyszłych pokoleń, wybierając rozwiązania mu przyjazne, a nie najtańsze.

BIBLIOGRAFIA

[1] Borkowski M., Ocena cyklu istnienia obiektów budowlanych na przykładzie budownictwa jednorodzinne, Przegląd Budowlany 3/2015, http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-6c3cd170-2d44-4d10-a9cc-68f0a1231f10/c/Borkowski_Ocena_03_2015.pdf

- [2] Broniewicz F., Broniewicz B., Sustainability of Steel Office Buildings, Energies, https://www.researchgate.net/publication/343082410_Sustainability_of_Steel_Office_Buildings
- [3] Cajot L. S., Labory F., Sustainability of buildings made of steel, https://www.researchgate.net/publication/278673238_Sustainability_of_buildings_made_of_steel
- [4] Hauke B., Kuhnhenne M., Lawson M., Veljkovic M., Siebers R., Sustainable steel buildings. A practical guide for structures and envelopes (ebook), John Wiley & Sons, Ltd, 2016
- [5] Ignatowicz G., Realizacja zasady zrównoważonego rozwoju w polityce ekologicznej Polski po konferencjach w Rio de Janeiro w 1992 oraz w 2012 roku, https://repozytorium.uwb.edu.pl/jspui/bitstream/11320/3457/1/BSP_18_2015_Ignatowicz.pdf
- [6] Tylek I., Kuchta K., Stale wysokiej wytrzymałości w konstrukcjach budowlanych, Inżynier Budownictwa 4/2020
- [M1] ArcelorMittal: Climate Action in Europe, <https://constructalia.arcelormittal.com/files/climate-action-in-europe-f66053746faa761760cde7c9c4dad1a8.pdf>
- [M2] ArcelorMittal: Our steel solutions for your green building, <https://constructalia.arcelormittal.com/files/7%20AM%20%20GreenBuilding-934cd3dbf48844e4942e25293fe1c263.pdf>
- [M3] ArcelorMittal Poland: Raport zrównoważonego rozwoju, https://poland.arcelormittal.com/fileadmin/Content/user_upload/ArcelorMittal_Poland_Raport_zrownowazonego_rozwoju_za_2020.pdf
- [M4] European Commission: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and Committee of the Regions. A renovation wave for Europe – greening our buildings, creating jobs, improving lives
- [M5] European Commission: Energy efficient buildings through innovative systems in steel, Research Fund For Coal and Steel, 2008
- [M6] https://architektura.info/architektura/polska_i_swiat/dworzec_glowny_w_wiedniu
- [M7] KAPE Krajowa Agencja Poszanowania Energii S.A., Środowiskowe aspekty nowoczesnego budownictwa drewnianego, Warszawa, 2019
- [M8] PLGBC Polskie Stowarzyszenie Budownictwa Ekologicznego: Certyfikacja zielonych budynków w liczbach. Raport, 2021
- [M9] rockwool.com/pl/inspiracje-baza-wiedzy/efektywnosc-energetyczna/filary-zrownowazonego-rozwoju
- [M10] Smol M., Materiały do zajęć „LCA”, http://www.cj.pk.edu.pl/wordpress/wp-content/uploads/2018/01/PK-Materia%C5%82y_LCA-stycze%C5%84-2018.pdf