

MIŁOWY KROK PROWADZĄCY DO POZNANIA PROCESU ZMĘCZENIA MATERIAŁÓW

KATASTROFA, KTÓRA PRZYSŁUŻYŁA SIĘ NAUCE

część 2



MGR INŻ. MARIUSZ ŁABĘDŹ

Główny Specjalista Urzędzeń Transportu Bliskiego
Oddział w Krakowie
Biuro w Tarnowie
Urząd Dozoru Technicznego

CEN:
TC147 Cranes – Safety
WG2 Design – General



W połowie XX w. wytworzenie pierwszego na świecie pasażerskiego samolotu napędzanego silnikami odrzutowymi było nie lada wyzwaniem dla konstruktorów. W założeniach samolot ten miał dysponować hermetyzowaną ciśnieniową kabiną pasażerską oraz mógł poruszać się ze znacznie większą prędkością i latać na większych wysokościach niż wykorzystywane wówczas statki powietrzne.

Opisany w wydaniu 2/2025 magazynu „Inspektor” przypadek samolotu Comet 1 stał się cenną lekcją dla środowiska inżynierów. Do dzisiaj nie tylko branża lotnicza korzysta z tych doświadczeń.



W przypadku gdy dana konstrukcja jest cyklicznie obciążana i odciążana, krytycznym kryterium jej nośności jest zwykle wytrzymałość zmęczeniowa. Przykładami konstrukcji pracujących przy obciążeniach zmiennych są np. dźwignice, środki transportu, mosty, cyklicznie napełniane i opróżniane zbiorniki ciśnieniowe i magazynowe, konstrukcje morskie. Jeśli zmęczenie materiału nie zostanie właściwie uwzględnione w projekcie, uszkodzenie zmęczeniowe dające początek katastrofie może wystąpić dość szybko, w ciągu zaledwie kilkudziesięciu cykli pracy konstrukcji lub w stosunkowo długim okresie eksploatacji, np. po kilku milionach cykli. Stanowi ono realne zagrożenie, dlatego też analiza trwałości zmęczeniowej w tym przypadku jest niezbędna.

Zmęczenie materiału to proces zmian zachodzących w materiale pod wpływem zmiennych w czasie obciążeń zewnętrznych, które mogą doprowadzić do powstania w nim uszkodzeń.

DOŚWIADCZENIE PRZEMYSŁU LOTNICZEGO NABYTE NA SKUTEK KATASTROF COMET 1

Comet 1 stał się samolotem, na przykładzie którego cały przemysł lotniczy uczył się tego, jak zachowują się hermetyzowane kadłuby pracujące w warunkach zmęczenia oraz jaki wpływ ma to na ich trwałość.

Aspekty ujawnione w trakcie dochodzenia powypadkowego przyczyniły się do sformułowania wymownego komentarza, zamieszczonego w raporcie końcowym [1]:

„Obecnie wiadomo już na tyle dużo o fundamentalnej fizyce zmęczenia, aby inżynierowie mieli świadomość, że wciąż jest jeszcze wiele do nauczenia”.

W toku dochodzeń sformułowano wiele rewolucyjnych na ówczesne czasy wniosków, zaleceń oraz spostrzeżeń skierowanych do producentów statków powietrznych. W raportach zawarto między innymi wymienione stwierdzenia:

- Projektowanie, produkcja oraz konserwacja powinny opierać się na dokładnym zrozumieniu własności zmęczeniowych konstrukcji. Niewystarczająca wiedza i doświadczenie może skutkować katastrofami. Szczególną uwagę należy zwrócić na takie aspekty jak dobór materiału, jego grubość, geometrię, poziomy naprężeń w danych węzłach.
- Zastosowanie dużych współczynników bezpieczeństwa przy określaniu wytrzymałości statycznej nie niweluje skutków zmęczenia.
- Na skutek koncentracji naprężeń, ich poziom w danym obszarze może być znacznie wyższy niż obliczeniowe naprężenia średnie. W kalkulacjach należy brać pod uwagę możliwość wystąpienia karbu geometrycznego będącego powodem spiętrzenia naprężeń.
- Podczas wykonywania operacji polegających na nawiercaniu otworów np. na śruby, nity, należy eliminować możliwość powstawania wad produkcyjnych. Mogą one stanowić miejsca inicjacji pęknięć zmęczeniowych. Występowanie nawet niewielkich pęknięć produkcyjnych przy otworach nie powinno być akceptowane.
- Ponieważ konfiguracja testów zmęczeniowych nie odzwierciedlała rzeczywistych warunków pracy konstrukcji, ich wyniki niecelowo zostały zafałszowane. Badany zmęczeniowo kadłub najpierw został lokalnie umocniony podczas próby ciśnieniowej i to nieumyślnie wydłużyło trwałość zmęczeniową. Błędem było wykonanie tych czynności na tym samym egzemplarzu kadłuba. Badania należy zatem przeprowadzać na próbkach reprezentatywnych dla samolotu produkcyjnego.

Wiele z powyższych zaleceń dla dzisiejszego inżyniera wydaje się być oczywista. Należy jednak mieć świadomość, że obecny poziom znajomości tematu zawdzięczamy m.in. zdarzeniom, których niechlubnym bohaterem był Comet 1. Nie powinniśmy zapominać, że w katastrofach zginęli ludzie i to oni zapłacili najwyższą cenę za rozwój technologii, które służą kolejnym pokoleniom.



Oprócz nowatorskiego projektu, Comet 1 okazał się maszyną pionierską na jeszcze jednym polu. Mowa tu o zakresie badań powypadkowych i ponownych testów certyfikacyjnych. Seria katastrof i podjęte w celu ich wyjaśnienia działania, stały się przyczyną modyfikacji standardów oraz zaleceń dotyczących badań wytrzymałościowych i testów, potrzebnych do uzyskania świadectwa zdatości do lotu dla maszyn budowanych w późniejszym czasie.

Konsekwencją katastrof Comet 1 oraz związanych z tym śledztw, była również częściowa zmiana zasad projektowania konstrukcji samolotów komercyjnych pod względem wytrzymałości zmęczeniowej. Oprócz powszechnie stosowanej koncepcji *Safe-Life*, rozpoczęto również stosowanie w projektowaniu koncepcji *Fail-Safe* dla określonych komponentów. Doświadczenie zebrane przy eksploatacji Comet 1 pokazało, że pęknięcia mogą czasem pojawiać się znacznie wcześniej niż przewidywano w projekcie, ze względu na ograniczenia w dostępnych wówczas analizach zmęczeniowych. Założono, że na podstawie koncepcji *Safe-Life*, w aspekcie ekonomicznym lotnictwa cywilnego, w niektórych przypadkach, bezpieczeństwo konstrukcji nie może zostać zagwarantowane bez narzucania krótkiego okresu użytkowania głównych komponentów konstrukcji. Począwszy od około 1955 roku, znacząca stała się dyskusja na temat stosowania podejścia *Safe-Life* oraz *Fail-Safe*.

Koncepcja bezwarunkowej żywotności (ang. Safe-Life Design) - podejście w projektowaniu zapewniające niezawodność komponentu w okresie jego użytkowania, bez konieczności regularnych kontroli na okoliczność uszkodzeń, powstałych w okresie eksploatacji. Podejście opiera się na założeniu wycofania z eksploatacji elementu, przed osiągnięciem jego trwałości projektowej, czyli tzw. rezerwu określonego np. w godzinach pracy czy liczbie cykli.

Koncepcja bezpiecznego uszkodzenia (ang. Fail-Safe Design) – podejście w projektowaniu zakładające możliwość pojawienia się uszkodzenia, które jednak do czasu jego wykrycia nie zagraża bezpieczeństwu. Koncepcja opiera się na założeniu, że powstałe uszkodzenie zostanie wykryte w trakcie planowych inspekcji, zanim osiągnie katastrofalne granice.

W późniejszych latach przemysł lotniczy doszedł do wniosku, że stosowanie powyższych koncepcji było nadto konserwatywne i w wielu przypadkach prowadziło do niedoszacowania rzeczywistej trwałości zmęczeniowej. W konsekwencji, pomimo braku uszkodzeń zmęczeniowych, samoloty były wycofywane z eksploatacji, co uznano za podejście wysoce nieekonomiczne. Z tego też względu w późniejszym czasie w lotnictwie zapoczątkowano wykorzystanie **metody tolerancyjnych uszkodzeń (ang. Damage Tolerance Design)**, opierającej się na monitorowaniu wielkości uszkodzenia oraz prędkości jego rozwoju przy wykorzystaniu zasad mechaniki pęknięcia.

Ciekawostką jest, że na przestrzeni czasu, Europejczycy projektanci samolotów cywilnych byli bardziej sceptyczni w kwestii stosowania *Fail-Safe* niż Amerykanie [4]. Z drugiej strony, w niektórych przypadkach projektowanie statków powietrznych dla sektora wojskowego nadal może opierać się na podejściu *Safe-Life*.

Po dzień dzisiejszy przypadek kadłubów Comet 1 cieszy się zainteresowaniem środowisk akademickich zajmujących się nauką o zmęczeniu materiału. W dalszym ciągu naukowcy prowadzą badania oraz analizy, będące źródłem coraz to bardziej dokładnych obliczeń trwałości.

CZEGO NAUCZYŁY NAS KATASTROFY SAMOLOTÓW COMET? - SPUŚCIZNA, Z KTÓREJ KORZYSTAMY DZIŚ



Przypadek samolotu Comet 1 stał się cenną lekcją dla środowiska inżynierów. W obecnych czasach nie tylko branża lotnicza korzysta z tych doświadczeń.

W przypadku, gdy dana konstrukcja jest cyklicznie obciążana i odciążana, krytycznym kryterium jej nośności jest zwykle wytrzymałość zmęczeniowa.

Przykłady konstrukcji pracujących przy obciążeniach zmiennych:

- dźwignice
- środki transportu
- mosty
- cyklicznie napelniane i opróżniane zbiorniki ciśnieniowe
- magazynowe konstrukcje morskie

Jeśli zmęczenie materiału nie zostanie właściwie uwzględnione w projekcie, uszkodzenie zmęczeniowe dające początek katastrofie może wystąpić dość szybko, w ciągu zaledwie kilkudziesięciu cykli pracy konstrukcji lub w stosunkowo długim okresie eksploatacji np. po kilku milionach cykli. Stanowi ono realne zagrożenie, dlatego też analiza trwałości zmęczeniowej w tym przypadku jest niezbędna.



Tu producentom, dzisiaj z pomocą przychodzi norma, specyfikacje techniczne czy też opracowania naukowe. Istnieje wiele skierowanych do projektantów dokumentów, które stanowią wytyczne i pomoc zarazem. Opisane są w nich metody oceny nośności zmęczeniowej elementów, połączeń i węzłów narażonych na obciążenia zmęczeniowe. Poniżej zasygnalizowanych zostanie kilka wybranych przykładów.

I. STALOWE KONSTRUKCJE BUDOWLANE

W roku 1975 Komisja Wspólnoty Europejskiej, ustaliła program działań w zakresie budownictwa. Jego celem było usunięcie przeszkód technicznych w handlu i harmonizacja specyfikacji technicznych. W wyniku programu opracowano serię tzw. eurokodów.

PN-EN 1993-1-9:2007 - Projektowanie konstrukcji stalowych - Część 1-9: Zmęczenie [5] dotyczy zastosowania stali w wyrobach budowlanych, obiektach budowlanych oraz obiektach inżynierskich.

Eurokod bazuje na dwóch metodach oceny zmęczenia:

- metoda tolerowanych uszkodzeń lub
- metoda bezwarunkowej żywotności.

Zastosowanie metody tolerowanych uszkodzeń jest dopuszczalne, o ile, w przypadku wystąpienia uszkodzenia zmęczeniowego możliwa jest redystrybucja sił wewnętrznych między elementami konstrukcji.



Rys. 1. Przykładowy obiekt inżynierski

Wytrzymałość zmęczeniowa, uwzględniająca wpływ karbów strukturalnych i geometrycznych, określona została przez kategorię zmęczeniową, podaną dla poszczególnych elementów. Na rysunkach szczegółów konstrukcyjnych przedstawionych w normie wskazano także prawdopodobne miejsca inicjacji pęknięć.

Tabela. 1. Przykłady szczegółów konstrukcyjnych [5 – tab. 8]

Kategoria zmęczeniowa	Szczegół konstrukcyjny	Opis karbu
125		10) Podłużne spoiny czołowe, z obustronnie obrobionymi licami; kierunek obróbki zgodny z kierunkiem obciążenia; w całości poddane badaniom nieniszczącym (100% NDT).
112		10) Spoiny nieszlifowane bez kraterów
90		10) Spoiny z kraterami
50		13) Styki śrubowe z jednostronnymi lub dwustronnymi nakładkami i zwykłymi otworami; przy obciążeniu jednoosiowym

II. PRZEWODNIK PO PROJEKTOWANIU I OCENIE ZMĘCZENIOWEJ WYROBÓW STALOWYCH

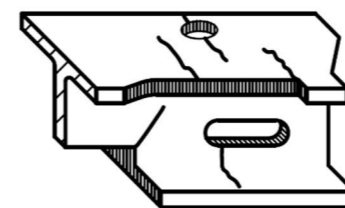
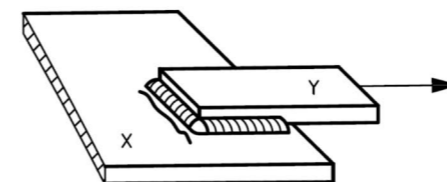
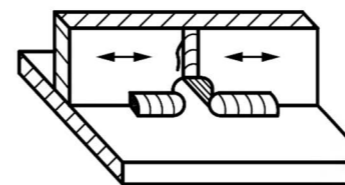
Brytyjska norma **BS 7608:2014+A1:2015 Guide to fatigue design and assessment of steel products [9]** określa metody oceny trwałości zmęczeniowej. Ma ona zastosowanie do wszystkich obszarów przemysłowych, nieobjętych innymi normami wyrobu lub normami branżowymi (np. EN 13445, EN 1993, EN ISO 19902), które opisują zasady oceny zmęczenia.

- Zaproponowana tu filozofia projektowania dopuszcza zastosowanie podejścia bezwarunkowej żywotności bądź metody tolerowanych uszkodzeń.

Podobnie i tu, na potrzeby projektowania zmęczeniowego, szczegóły konstrukcyjne zostały podzielone na kilka klas. Każdej klasie odpowiada określona krzywa S-N. Klasyfikacja ta została uzależniona od następujących czynników: rodzaju oraz kierunku naprężenia, geometrii szczegółu, potencjalnego miejsca inicjacji pęknięcia, metod produkcji oraz kontroli.

Krzywa Wöhlera jest klasycznym wykresem zmęczeniowym, przedstawiającym zależność pomiędzy zakresem naprężenia (S), a liczbą cykli (N) do momentu wystąpienia uszkodzenia.

Wykorzystanie krzywych S-N umożliwia projektantom określenie bezpiecznych poziomów obciążeń dla elementów pracujących w warunkach cyklicznie zmieniających się naprężeń.



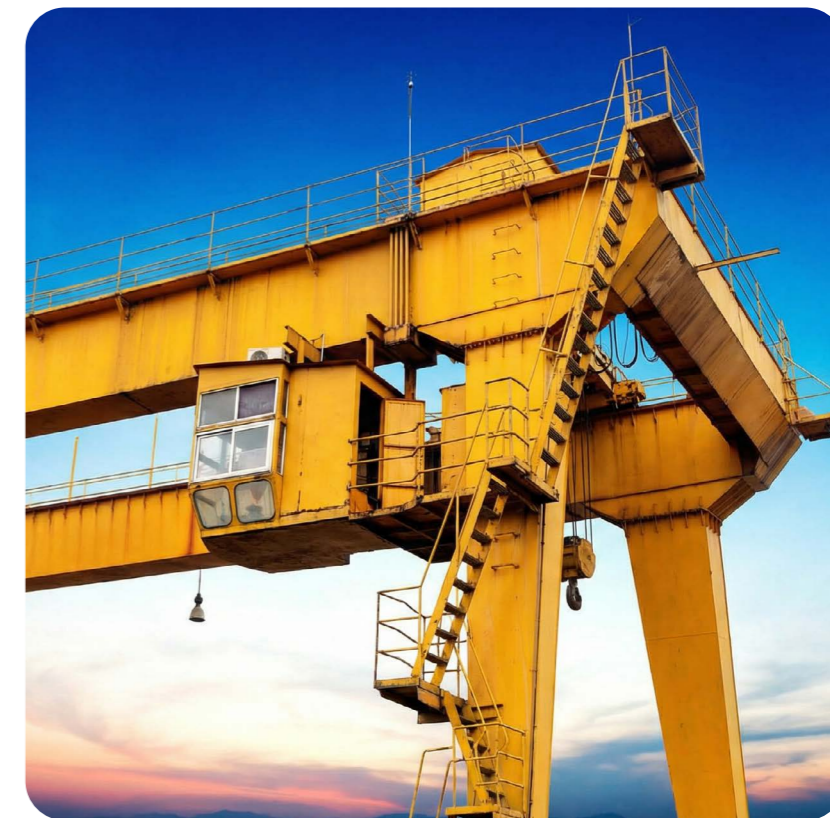
Rys. 2. Przykłady szczegółów konstrukcyjnych [9 - tab. 1, 6, 7]

Ponadto, w załączniku D zawarto przewodnik dotyczący zasad stosowania mechaniki pęknięcia. Natomiast w załączniku F, norma opisuje niektóre techniki ulepszania brzegu spoiny, skutkujące zwiększeniem trwałości oraz wytrzymałości zmęczeniowej złącza spawanego.

III. PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI DŹWIGNIC

Trzyczęściowa seria europejskich norm EN 13001 została opracowana z myślą o budowie urządzeń dźwignicowych. Celem obliczeń wymaganych przez **PN-EN 13001-1:2015-05 - Dźwignice - Ogólne zasady projektowania - Część 1: Postanowienia ogólne i wymagania [6]** jest teoretyczne wykazanie, że dźwignica została zaprojektowana zgodnie z wymaganiami, które zabezpieczają ją przed zagrożeniami mechanicznymi, przy uwzględnieniu warunków transportu, montażu, użytkowania i demontażu. W każdym przypadku, w celu potwierdzenia wytrzymałości zmęczeniowej norma narzuca konieczność ustalenia liczby oraz wartości poszczególnych cykli naprężeń.

- Celem sprawdzania poprawności budowy, norma dopuszcza wykorzystanie metody stanów granicznych lub metody naprężeń dopuszczalnych.



Rys. 3. Suwnica bramowa

Z myślą o budowie konstrukcji nośnych opracowana została część trzecia **PN-EN 13001-3-1+A2:2018-05 - Dźwignice - Ogólne zasady projektowania - Część 3-1: Wyznaczenie ograniczeń i właściwości stalowych ustrojów nośnych [7]**. Przeprowadzenie wymaganych przez normę obliczeń wytrzymałości zmęczeniowej ma na celu zapobieganie ryzyku awarii spowodowanej tworzeniem się oraz rozprzestrzenianiem krytycznych pęknięć w elementach konstrukcyjnych lub połączeniach, które mogą powstawać pod wpływem obciążeń cyklicznych. Dokument określa warunki wykonywania przykładowych elementów konstrukcyjnych oraz połączeń (załącznik normatywny D, załącznik informacyjny H).

Założenia normy uwzględniają m.in. lokalne spiętrzenie naprężeń będące skutkiem kształtu i geometrii, wielkość oraz kształt dopuszczalnych niezgodności, sposób oraz poziom obciążenia, naprężenia spawalnicze, stan metalurgiczny. W przypadku połączeń spawanych, zakres naprężeń dopuszczalnych w danym węzle norma uzależnia od poziomu jakości złącza wg EN ISO 5817.

Tabela. 2. Przykład szczegółu konstrukcyjnego [7 - zał. D oraz H]

Detail nr	$\Delta\sigma_c$ $\Delta\tau_c$ N/mm ²	Szczegół konstrukcyjny
1.3	m = 5	
	80	Niezależnie od f_y
	100	$180 < f_y \leq 220$
	112	$220 < f_y \leq 320$
	125	$320 < f_y \leq 500$
	140	$500 < f_y \leq 650$

W podobny sposób zagadnienia związane z zapewnieniem wymaganej wytrzymałości zmęczeniowej dźwignic, opisane zostały w międzynarodowej normie **ISO 20332:2016 Cranes - Proof of competence of steel structures [8]**.

IV. PROJEKTOWANIE WYBRANYCH ZBIORNIKÓW CIŚNIENIOWYCH

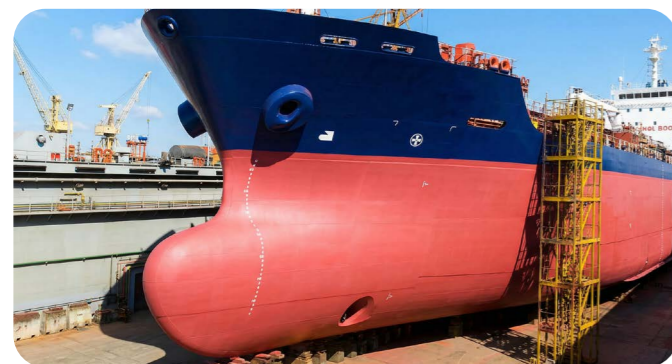
Zapoczątkowane w latach 90. prace, skutkowały wprowadzeniem w 2002 r. w normie **PN-EN 13445-3:2021-10 - Nieogrzewane płomieniem zbiorniki ciśnieniowe - Część 3: Projektowanie [10]** dwóch podejść w zakresie zmęczenia.

Opracowano wymagania dotyczące uproszczonej (rozdz. 17) oraz szczegółowej (rozdz. 18) oceny trwałości zmęczeniowej.

- Ocena uproszczona bazuje na korzystaniu ze wzorów i obowiązuje głównie w przypadku zmian ciśnienia.
- Natomiast ocena szczegółowa, która może być stosowana również w przypadku obciążeń zmiennych nie pochodzących od zmian ciśnienia, opiera się na dokładniejszych analizach wykorzystujących np. metodę elementów skończonych lub metody eksperymentalne.

W celu zapewnienia wymaganej wytrzymałości zmęczeniowej, projektant powinien wziąć pod uwagę każdy szczegół konstrukcyjny, który mógłby stanowić potencjalne miejsce inicjacji pęknięć zmęczeniowych. Podobnie jak w przypadku innych norm dotyczących projektowania, analiza wytrzymałości zmęczeniowej wg EN 13445-3 opiera się na wykorzystaniu krzywych S-N. Ponadto w informacyjnym załączniku M, norma podaje wskazówki dotyczące sposobu monitorowania zbiornika ciśnieniowego w trakcie eksploatacji, o ile pracuje on w warunkach zmęczenia lub pełzania.

V. PROJEKTOWANIE STALOWYCH KADŁUBÓW STATKÓW



Rys. 4. Kadłub tankowca

Przepisy opublikowane przez Polski Rejestr Statków S.A. pod nazwą „**Publikacja 45/P - Analiza wytrzymałości zmęczeniowej stalowego kadłuba statku [12]**” zawierają wymagania dotyczące analizy wytrzymałości zmęczeniowej kadłubów statków, poddanych zmiennemu w czasie naprężeniu, wywołanym przez siły bezwładności ładunku, wyposażenia i konstrukcji statku, generowane w warunkach ruchu statku na fali oraz generowane w tych warunkach ciśnienia dynamiczne wody. Innymi słowy publikacja określa sposoby przeprowadzania obliczeń pozwalających oszacować, czy proponowane rozwiązanie konstrukcyjne kadłuba posiada wystarczającą wytrzymałość zmęczeniową dla założonego okresu eksploatacji statku, trwającego przeważnie 25 lat.

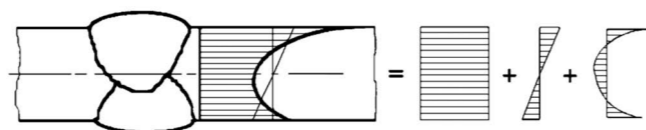
Obliczenia wytrzymałości zmęczeniowej elementów konstrukcji kadłuba wg 45/P mogą być wykonane:

- metodą uproszczoną, opierającą się na tradycyjnym zastosowaniu krzywych Wöhlera,
- poprzez bezpośrednie obliczanie wytrzymałości zmęczeniowej,
- poprzez analizę naprężeń metodą elementów skończonych.

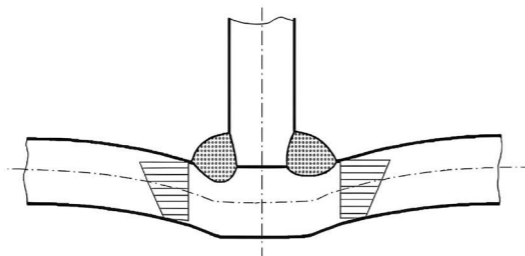
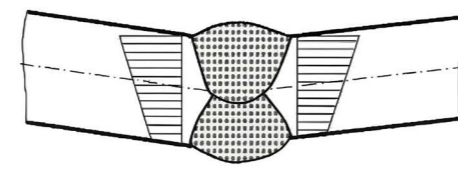
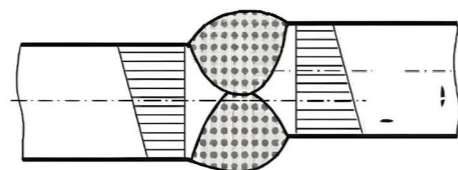
VI. PROJEKTOWANIE POŁĄCZEŃ SPAWANYCH

Zalecenia opisane w **Recommendations for fatigue design of welded joints and components [11]**, opublikowane przez *International Institute of Welding (IIW)*, opisują zasady projektowania elementów spawanych obciążanych siłami zmiennymi, mające na celu zapewnienie trwałości zmęczeniowej. Wytyczne te przedstawiają metody oceny uszkodzeń zmęczeniowych, które mogą mieć wpływ na stany graniczne konstrukcji, takie jak stan nośności oraz stan użytkowania.

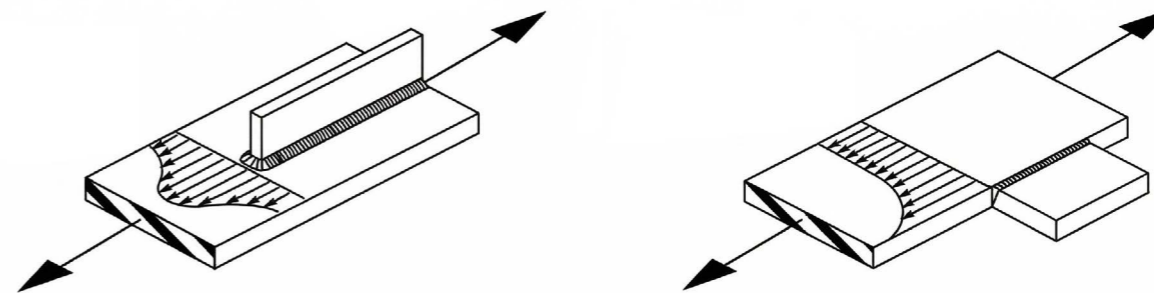
W związku z faktem, że w obszarze karbu rozkład naprężeń w przekroju ma przebieg nieliniowy, w celu ułatwienia pracy projektantom, specyfikacja prezentuje sporo możliwych przypadków oraz dokonuje analizy rzeczywistych rozkładów naprężeń.



Rys. 5. Przykładowy rozkład naprężeń w złączu doczołowym [11]



Rys. 6. Przykłady rozkładu naprężeń w przypadku wystąpienia odchylenia osiowego [11]



Rys. 7. Przykładowe rozkłady naprężeń w detalach konstrukcyjnych [11]

Pośród podejść prowadzących do określania naprężeń wyszczególnione zostały:

- Metody oparte na krzywych S-N, takie jak:
 - metoda naprężeń nominalnych (ang. nominal stress method),
 - metoda naprężeń geometrycznych (ang. hot spot stress method),
 - metoda efektywnych naprężeń karbu (ang. effective notch stress method).
- Metody oparte na analizie propagacji pęknięć zmęczeniowych (wykorzystujące prawo Parisa).
- Metody oparte na eksperymentalnym, bezpośrednim badaniu wytrzymałości zmęczeniowej komponentów lub całych konstrukcji.

Prawo Parisa jest narzędziem wykorzystywanym w mechanice pęknięcia. Opisuje ono empirycznie zależność pomiędzy prędkością wzrostu pęknięcia a współczynnikiem intensywności naprężeń. Znajduje zastosowanie w liniowym zakresie krzywych prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych.

Zastosowanie prawa Parisa umożliwia przewidywanie i modelowanie zachowania pęknięć podczas obciążeń zmęczeniowych.

Ponadto dokument opisuje cztery koncepcje, aktualnie stosowane podczas projektowania, częściowo już wspomniane we wcześniejszej części artykułu:

- Metoda nieskończonej żywotności (ang. Infinite-Life Design),
- Metoda bezwarunkowej żywotności (ang. Safe-Life Design),
- Metoda bezpiecznego uszkodzenia (ang. Fail-Safe Design),
- Metoda tolerowanych uszkodzeń (ang. Damage Tolerance Design).

Literatura:

- Ministry of Transport and Civil Aviation: Report of the Court of Inquiry into the Accidents to Comet G-ALYP on 10th January, 1954 and Comet G-ALYY on 8th April, 1954. London, 1955.
- Aviation Safety Network, <https://asn.flightsafety.org>
- Wanhill R.J.H.: A review of the De Havilland Comet I G-ALYP fuselage failure based on the Court of Enquiry Report (1955) and publications by T. Swift (1987) and P.A. Withey (1997, 2019). Royal Netherlands Aerospace Centre, 2020.
- Zieliński W.: Analiza możliwości zwiększenia dokładności monitorowania zużycia zmęczeniowego konstrukcji samolotu Su-22 na podstawie danych z pokładowego rejestratora parametrów lotu i systemu monitorowania obciążeń. Rozprawa Doktorska, WAT, Warszawa 2022.
- PN-EN 1993-1-9:2007 - Projektowanie konstrukcji stalowych - Część 1-9: Zmęczenie.
- PN-EN 13001-1:2015-05 - Dźwignice - Ogólne zasady projektowania - Część 1: Postanowienia ogólne i wymagania.
- PN-EN 13001-3-1+A2:2018-05 - Dźwignice - Ogólne zasady projektowania - Część 3-1: Wyznaczanie ograniczeń i właściwości stalowych ustrojów nośnych.
- ISO 20332:2016 Cranes - Proof of competence of steel structures.
- BS 7608:2014+A1:2015 - Guide to fatigue design and assessment of steel products.
- PN-EN 13445-3:2021-10 - Nieogrzewane płomieniem zbiorniki ciśnieniowe - Część 3: Projektowanie.
- IIW-1823-07/XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07 - Recommendations for fatigue design of welded joints and components.
- Publikacja 45/P - Analiza wytrzymałości zmęczeniowej stalowego kadłuba statku - Polski Rejestr Statków S.A., Gdańsk, 2022.



Rys. 8. Fragment ramy wózka podnośnikowego