

Autoreferat

1. Imię i Nazwisko: Szymon Imiełowski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

Dyplom ukończenia studiów magisterskich na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, w zakresie budownictwa, na specjalności konstrukcje budowlane i inżynierskie, z tytułem: magistra inżyniera budownictwa.

Dyplom nr: 4186/111025, z dnia 3 listopada 1983.

Dyplom uzyskania stopnia naukowego doktora nauk technicznych, w zakresie robotyki i automatyki, wydany przez Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, w Warszawie, w dniu 19 marca 1992 r., na podstawie przedstawionej rozprawy doktorskiej pod tytułem „Stateczność układów dyskretno-ciągłych poddanych obciążeniom niekonserwatywnym”.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych.

Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska,
od 1.10.2010 - Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN:

01.2008 - 30.09.2010 Pracownia Sterowania i Dynamiki Układów w Zakładzie
Technologii Inteligentnych

07.1990 - 12.2007- Samodzielna Pracownia Dynamiki i Stateczności Maszyn i Pojazdów

01.1984 - 07.1990 - Samodzielna Pracownia Teorii Materiałów Niesprężystych

Politechnika Warszawska:

10.1997 - 09.2008 Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego Wydziału
Inżynierii Środowiska

10.1995 - 08.1997 Instytut Mechaniki Konstrukcji Inżynierskich Wydziału Inżynierii
Lądowej

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

Szymon Imiełowski, „**Deformacje, energia odkształcenia sprężystego w analizie stateczności konstrukcji inżynierskich**”, w serii wydawniczej „Studia z Zakresu Inżynierii”, wyd. Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, nr 102, 192 s., Warszawa 2019

Recenzenci: prof. dr hab. Wacław Szcześniak, prof. dr hab. Jacek Przybylski

Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Praca dotyczy opisu zjawiska wyboczenia i utraty stateczności prętów pryzmatycznych, o typowych stosowanych w budownictwie przekrojach kształtowników walcowanych, w szerokim zakresie smukłości. Nie uwzględnia się profili cienkościennych i przypadków lokalnej utraty stateczności.

W monografii rozważamy konstrukcję wraz z działającym obciążeniem, które stanowią układ mechaniczny. Rozważane są przykłady konstrukcji sprężystych. W tym przypadku bilans energetyczny układu jest określony rodzajem obciążenia. Rozważane są przykłady układów zachowawczych i układów niezachowawczych, w których energia jest do układu dodawana. W pracy wykorzystano model uogólnionej siły śledzącej, który umożliwia rozszerzoną analizę modeli energetycznych układu. Aktualne położenie siły uogólnionej, określone przez mimośród e punktu przyłożenia siły względem środka ciężkości przekroju i kąt nachylenia siły χ względem stycznej do osi pręta, ulegają zmianie podczas obciążania, są liniową funkcją przemieszczenia i kąta obrotu obciążonego przekroju, opisaną czterema parametrami: $\bar{\rho}, \bar{\vartheta}, \bar{\mu}, \bar{\gamma}$. Szczególnymi przypadkami siły uogólnionej są siła o stałym kierunku i punkcie przyłożenia (zadanie Eulera) i siła styczna do osi pręta (zadanie Becka). Uwzględnienie szerokiej gamy obciążenia umożliwiło wyodrębnienie cech konstrukcji, niezależnych od obciążenia, które decydują o utracie stateczności.

Cel naukowy przedstawionej pracy:

a) Podstawowym celem podjęcia badań była chęć weryfikacji aktualnych modeli zjawiska utraty stateczności, pod kątem uwzględnienia wszystkich efektów, obserwowanych w eksperymencie. Współczesne wyniki badań wskazują, że wyjaśnienie utraty stateczności prętów na podstawie zjawiska bifurkacji położenia równowagi nie w pełni odpowiada rzeczywistemu przebiegowi zjawisk. Ugięcie osi pręta występuje już w zakresie dokrytycznym. W literaturze rozróżnia się pojęcie modelu matematycznego wyboczenia od wyboczenia obserwowanego w eksperymencie, a jako podstawę opisu stanu krytycznego i wytłumaczenia obecności ugięcia pręta przyjmuje się obecność imperfekcji. Taki stan wiedzy powoduje, że opis wyboczenia jest zwykle związany z konkretną klasą przekroju i rodzajem materiału, z którego jest wykonana konstrukcja. Aktualnie nie ma ujednoczonych metod obliczania konstrukcji na wyboczenie. W krajowych zaleceniach normowych panuje jeszcze duża różnorodność.

b) Wiarygodny opis zjawiska wyboczenia i utraty stateczności umożliwia kryterium energetyczne, w którym parametrem określającym stopień wyężenia materiału w zagadnieniu stateczności jest poziom energii odkształcenia sprężystego, a stan krytyczny jest opisany warunkiem maksimum energii odkształcenia sprężystego jaka może być zgromadzona w ściskanym pręcie i utratą zdolności do odkształcenia sprężystego. Sformułowanie różni się od znanego w literaturze kryterium energetycznego, w którym minimalizuje się całkowitą energię

potencjalną układu. W literaturze można znaleźć prace, w których kryterium zostało zweryfikowane na przykładzie prętów o przekroju kołowym, wykonanych ze stali o wysokiej wytrzymałości. Chęć weryfikacji tego kryterium na przypadek dowolnego materiału oraz dowolnego kształtu stosowanych w praktyce inżynierskiej profili ekonomicznych: kątowników, ceowników czy teowników, oraz wyjaśnienie czy zaproponowana definicja dotyczy również utraty stateczności układów niezachowawczych była motywacją podjęcia tematyki badań. W jaki sposób poziom energii sprężystej jest uwzględniony w przypadku analizy z wykorzystaniem dynamicznego kryterium stateczności?

c) Ważnym zjawiskiem występującym w analizie stateczności pręta ściskanego są zmiany sztywności. W przypadku obciążenia pręta siłą o stałym kierunku działania, zwiększenie obciążenia powoduje zmniejszanie jego sztywności poprzecznej. Miarą sztywności poprzecznej jest częstotliwość drgań własnych ω . Zupełnie inaczej zachowują się pręty, w których obciążenie realizuje dopływ energii do układu, np. opływ cieczy. W tym przypadku obciążanie powoduje usztywnienie konstrukcji i wzrost podstawowej częstości drgań. Chęć zbadania zmian sztywności układu podczas obciążania była kolejną motywacją podjętej tematyki badań.

d) Kolejnym celem podjętej tematyki badań był chęć opisu deformacji pręta ściskanego. Rozwiązanie Eulera uwzględnia tylko jeden rodzaj deformacji, deformacje pręta ugiętego o osi nieściśliwej, który określa stan pręta poddanego działaniu siły krytycznej. Jak opisać deformacje pręta w zakresie dokrytycznym, tak aby pozostały w zgodzie z modelem Eulera, który daje weryfikowalne w eksperymencie wyniki?

e) Dodatkową motywacją była chęć zbadania odpowiedzi pręta w zakresie pokrytycznym. W jakim stopniu w rzeczywistej konstrukcji możliwe jest wzmocnienie pokrytyczne, które jest ważne z punktu widzenia odporności poawaryjnej konstrukcji. Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych wskazują, na możliwość niezerowej nośności w fazie obciążenia pokrytycznego. Otwarte pozostało pytanie, w jakich warunkach pracy rzeczywistej konstrukcji możliwe jest przyjęcie niezerowej nośności zakresu pokrytycznego.

f) W przypadku obciążenia siłą niezachowawczą lub pseudozachowawczą o zachowaniu statecznym decyduje nie tylko wartość energii odkształcenia sprężystego, ale również wartość energii, która jest dodana do układu poprzez obciążenie typu śledzącego. Dodana do układu energia może spowodować zwiększenie strzałki ugięcia formy własnej lub wygaszenie form, może być również powodem jakościowej zmiany kształtu formy własnej na kształt odpowiadający wyższemu poziomowi energetycznemu. Wartość siły krytycznej odpowiadająca wyższej formie własnej jest wielokrotnie wyższa niż siła krytyczna, która występuje z formą niższą. Jedną z motywacji była chęć zbadania, w jaki sposób kształt formy własnej jest związany z bilansem energetycznym układu oraz w jaki sposób można wykorzystać fakt zwiększonej nośności wynikający z utraty stateczności z wyższą formą własną w praktyce inżynierskiej.

g) Wobec faktu, że stan krytyczny jest określony poziomem energii sprężystej, a nie poziomem naprężenia, należy zaproponować nową definicję współczynników bezpieczeństwa,

w której byłyby uwzględnione pojęcie energii odkształcenia sprężystego. Aktualnie w normach współczynniki bezpieczeństwa przeważnie odnoszą się do cech wytrzymałościowych materiału.

h) Fakt, że w warunkach utraty stateczności pręt zachowuje postać ugiętą, powoduje, że graniczna smukłość wyboczenia sprężystego λ_H zdefiniowana z wykorzystaniem postaci prostoliniowej pręta nie jest dobrą granicą przyjętego podziału. Wymagana jest propozycja nowej klasyfikacji uwzględniająca rzeczywisty przebieg zjawiska wyboczenia. Chęć stworzenia takiego podziału był kolejną motywacją podjęcia tematyki badań.

Odpowiedź na sformułowane powyżej pytania wymagała podjęcia studiów teoretycznych i przeprowadzenia serii badań eksperymentalnych. Podstawowe wyniki uzyskałem w wyniku realizacji projektów badawczych NCN, których byłem kierownikiem:

1. Projekt badawczy habilitacyjny, 1173/B/T02/2011/40, "Kryterium energetyczne w analizie stateczności i dynamiki konstrukcji inżynierskich. Wybrane metody oceny bezpieczeństwa konstrukcji.", 13.06.2011-12.06.2012, Narodowe Centrum Nauki
2. Projekt Badawczy N50104131/2765: „*Analiza stanów krytycznych i pokrytycznych konstrukcji pod obciążeniem konserwatywnym i niekonserwatywnym. Badania eksperymentalne i teoretyczne, weryfikacja istniejących norm obliczeniowych*”, 15.11.2006 - 30.12.2009
3. Projekt Badawczy 7 T07A 00419 „*Analiza dynamiki i stateczności mechanicznych układów niezachowawczych i pseudozachowawczych. Teoria i weryfikacja eksperymentalna.*”, 1.07.2000-31.03.2004

Krótki opis monografii

W pierwszej części pracy przedstawiono modele teoretyczne stateczności prętów poddanych obciążeniom zachowawczym i niezachowawczym. W przypadku obciążeń zachowawczych omówiono rozwiązanie zadań Eulera i Lagrange'a. W obydwu zadaniach zwrócono uwagę, że rozwiązanie jest możliwe, gdy wykorzystany będzie warunek stanu krytycznego w postaci maksimum energii odkształcenia sprężystego. W dalszej części omówiono zagadnienia energii odkształcenia sprężystego i sztywności w analizie stateczności konstrukcji prętowych. Wskazano w jaki sposób warunek maksimum energii odkształcenia jest uwzględniony w opisie wybranych kryteriów utraty stateczności. Zaproponowano klasyfikację smukłości prętów ściskanych uwzględniającą warunek maksymalnej energii sprężystej. Zaproponowano model ewolucji deformacji pręta ściskanego. W przypadku analizy statycznej ewolucja odkształcenia pręta podczas ściskania zależy od relacji pomiędzy całkowitą energią odkształcenia sprężystego, a energią sprężystego odkształcenia postaciowego. Wyodrębniono trzy etapy deformacji: odkształcenie pręta prostoliniowego, etap pośredni, w którym pojawia się odkształcenie postaciowe i ugięcie osi pręta oraz etap ugięcia pręta o osi nieściśliwej.

W przypadku analizy z wykorzystaniem kryterium dynamicznego deformacją jest zbiór kolejnych form własnych odpowiadających danemu obciążeniu. W przypadku układów niezachowawczych i pseudozachowawczych wyjaśniono zjawisko jakościowej zmiany kształtu form własnych. Omówiono metodę analizy zadania stateczności na podstawie analizy krzywych charakterystycznych.

Zasadniczą część pracy stanowi opis eksperymentu stateczności prętów o przekrojach i smukłościach stosowanych w praktyce inżynierskiej. Zaproponowano oryginalny program badań stateczności prętów pryzmatycznych. Badania były realizowane w laboratoriach Zakładu Wytrzymałości Materiałów Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN oraz Zakładu Wytrzymałości Materiałów Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. W pracy zamieszczono opis przeprowadzonych badań stateczności aluminiowych i stalowych płaskowników oraz kształtowników i stalowych pasm płytowych oraz analizę uzyskanych wyników. W części badań uwzględniono pomiary tensometryczne odkształceń powierzchni bocznej prętów.

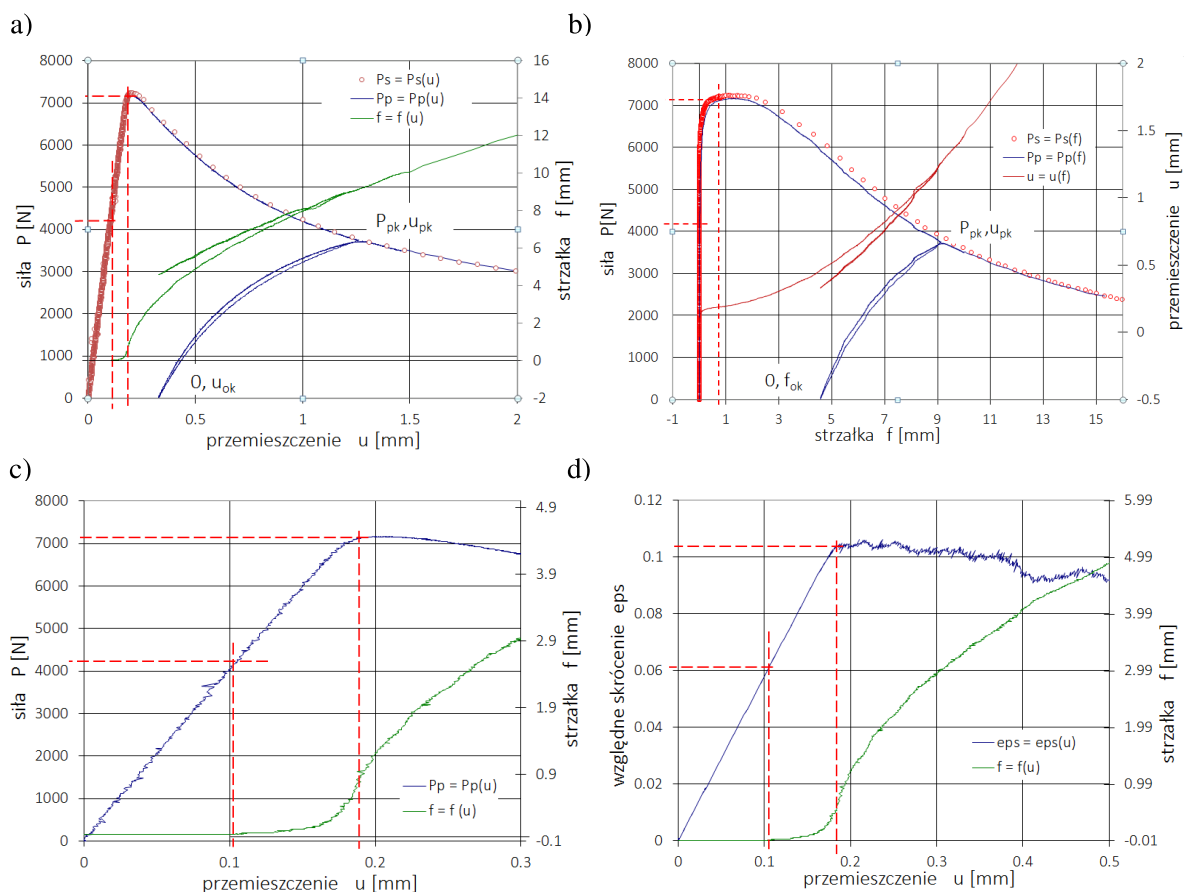
Omówienie wyników przeprowadzonych badań i głównych elementów zaproponowanej hipotezy stateczności

Model wyboczenia pręta, w którym energia sprężysta jest parametrem opisującym wyężenie materiału pręta, uwzględniający rozdzielanie etapów deformacji w procesie ściskania pręta pryzmatycznego stanowi niestandardowe ujęcie problemu stateczności. Zaproponowany model umożliwił wyjaśnienie przyczyny wyboczenia pręta niezależne od obecności imperfekcji materiałowych czy geometrycznych, co stanowi jeden z głównych rezultatów przedstawionej analizy. Poniżej przedstawiono dyskusję stateczności układów zachowawczych uzupełnioną wynikami badań układów niezachowawczych.

a) W pracy podkreślono, że pełny opis zjawiska stateczności jest możliwy na podstawie analizy wyników różnych metod raportowania wyników eksperymentu stateczności.

Podczas eksperymentu rejestrowano aktualną wartość siły P , strzałkę ugięcia pręta f i przemieszczenie u , w kierunku działania siły. Wyniki przedstawiono w postaci funkcji zmienności w czasie zarejestrowanych parametrów, $P = P(t)$, $f = f(t)$, $u = u(t)$, $P = P(u)$, oraz w postaci zależności $P = P(f)$, $f = f(u)$, $u = u(f)$, $\varepsilon = \varepsilon(u)$, $\sigma = \sigma(u)$, gdzie ε jest odkształceniem podłużnym, σ - naprężeniem normalnym. Przykładowe wykresy przedstawiono na rys.1 i 2. Każdy z przedstawionych sposobów raportowania wyników wnosi nowy element do analizy. Na podstawie wykresu $P = P(u)$ można określić wartość zbliżenia końców pręta w dowolnym etapie procesu ściskania, co umożliwia ocenę sztywności pręta, możliwe jest wyznaczenie energii procesu jako pola powierzchni pod krzywą wykresu. Możliwa jest również rejestracja przeskoku siły w warunkach utraty stateczności prętów średniej smukłości, nie są natomiast widoczne granice etapu pośredniego. Wartość siły P^* , przy której pojawia się przemieszczenie poprzeczne (dolna granica etapu przejściowego), można odczytać na wykresie $P = P(f)$, a

parametry górnej granicy etapu przejściowego (u_z, f_z) są współrzędnymi punktu przegięcia na wykresach $u = u(f)$ i $f = f(u)$. Wartość strzałki ugięcia stanu krytycznego lub granicznego są widoczne na wykresach $P = P(f)$. Program zmian parametrów w czasie: $P = P(t)$, $u = u(t)$, $f = f(t)$, uzupełnia opis procesu.



Rys.1. Wykresy ścieżek równowagi, aluminiowy płaskownik (pręt smukły), $\lambda = 101,3$:

a) i c) $P = P(u)$ i $f = f(u)$, b) $P = P(f)$ i $u = u(f)$, d) $eps = \varepsilon = \Delta l_{ef} / l_{ef}$ - względne skrócenie osi pręta, P - obciążenie, u – przemieszczenie (zbliżenie końców pręta), f - strzałka ugięcia. Liniją przerywaną zaznaczono początek i koniec etapu przejściowego.

b) Zaproponowano opis deformacji pręta w zakresie dokrytycznym. W przypadku analizy statycznej wyodrębniono trzy kolejno pojawiające się etapy odkształceń pręta ściskanego: skrócenie pręta o osi prostoliniowej, etap przejściowy (etap deformacji jednoczesnego mimośrodowego ściskania i ścinania) oraz ugięcie pręta o osi nieściśliwej. Określono granice przedziałów sił i przemieszczeń tych etapów. Rozpoznano i wytłumaczono mechanizm zmiany modów deformacji.

Zdefiniowanie etapu przejściowego stanowi oryginalny wkład do analizy stateczności prętów. Granice etapu przejściowego zaznaczono na rys.1 i 2 liniami przerywanymi. Oryginalnym wynikiem badań jest również propozycja kryterium zakończenia etapu odkształcenia pręta o osi prostoliniowej, określonego siłą P^* , w postaci warunku maksymalnej energii odkształcenia postaciowego, Hubera-Miesesa-Henky'ego.

Na wykresie $P=P(f)$ obciążenie P^* jest siłą, przy której pojawia się przemieszczenie poprzeczne, jej wartość wyznaczono z wzoru $P^* = P_E / \sqrt{3}$. W przypadku prętów, które przenoszą siłę krytyczną P_E jest wartością siły krytycznej. W przypadku średnich smukłości P_E jest wartością siły eulerowskiej jaką przeniósłby pręt o danej smukłości i granicy proporcjonalności, zapewniającej przeniesienie siły krytycznej w zakresie liniowej sprężystości.

W drugim etapie deformacji pojawia się odkształcenie postaciowe. Skutkiem odkształcenia postaciowego jest przemieszczenie przekrojów poprzecznych, powstanie mimośrodu obciążenia e i momentu zginającego $M = Pe$. Odkształcenie postaciowe występuje więc równocześnie z ugięciem osi pręta oraz skróceniem osi. Podczas etapu przejściowego intensywność odkształcenia normalnego pozostaje taka sama jak podczas pierwszego etapu deformacji. Na wykresach $P = P(u)$ i $\varepsilon = \varepsilon(u)$, rys.1 c i d widać, że intensywność przyrostu siły i odkształcenia podłużnego nie ulega zmianie przy przejściu do drugiego etapu deformacji. Dopiero w końcowej części tego etapu zginanie staje się obciążeniem dominującym, wtedy, ze względu na mały wpływ odkształcenia postaciowego i skrócenia osi, te odkształcenia można pominąć. Górna granica etapu przejściowego jest określona punktem przegięcia na wykresach $u(t)$ i $f(t)$, co jest widoczne na rys.1 c i d.

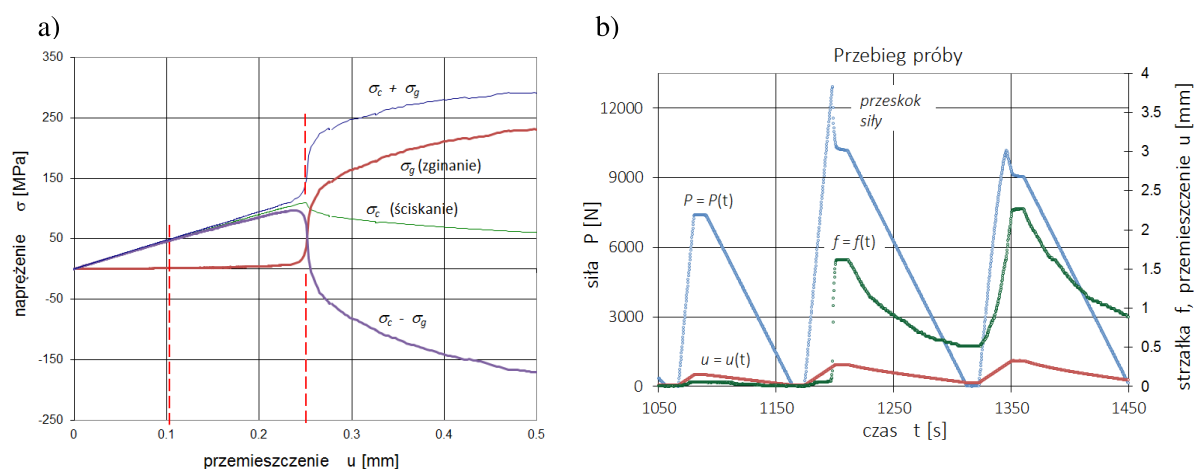
Trzecim etapem deformacji jest ugięcie pręta o osi nieściśliwej.

Należy podkreślić, że przyczyny zmiany modów deformacji zakresu dokrytycznego w obu przypadkach są inne. Powodem zakończenia etapu pierwszego jest warunek energetyczny, osiągnięcie maksymalnej wartości energii odkształcenia postaciowego. Przejście do etapu drugiego jest możliwe ponieważ kształt prostoliniowy jest kształtem wspólnym trzech rodzajów odkształceń. Pręt o osi prostoliniowej jest szczególnym przypadkiem odkształcenia postaciowego, w którym kąt odkształcenia postaciowego jest równy zeru oraz szczególnym przypadkiem pręta ugiętego, w którym kąt obrotu przekroju jest równy zeru. Warunkiem przejścia do trzeciego etapu deformacji jest natomiast warunek sztywności. Przejście do etapu deformacji pręta ugiętego o osi nieściśliwej następuje wtedy, gdy sztywność pręta ugiętego w kierunku działającej siły jest mniejsza od sztywności odkształcenia podłużnego.

c) Istotnym osiągnięciem pracy jest propozycja klasyfikacji smukłości, w której uwzględniono, że w warunkach stanu krytycznego/granicznego, pręt zachowuje postać ugiętą.

W przypadku granicznej smukłości zakresu wyboczenia sprężystego, λ_k , naprężenie w skrajnym ściskanym włóknie pręta ugiętego jest równe granicy liniowej sprężystości, którą jest granica proporcjonalności R_H lub granica umowna $R_{0,01}$. Smukłość λ_k , powyżej której pręty przenoszą siłę krytyczną jest więc większa od eulerowskiej granicznej smukłości λ_H , wyznaczonej przy założeniu postaci prostoliniowej. W przypadku prętów smukłych i dużych smukłości po przejściu do trzeciego etapu deformacji, pręty zachowują stateczne położenie równowagi, aż do osiągnięcia warunków utraty stateczności.

W przypadku średnich smukłości, $\lambda_0 < \lambda < \lambda_k$, utrata stateczności (stan graniczny) jest określona warunkiem zmiany etapu przejściowego w etap pręta ugiętego. Takie sformułowanie stanowi nową propozycję interpretacji stanu granicznego utraty stateczności.

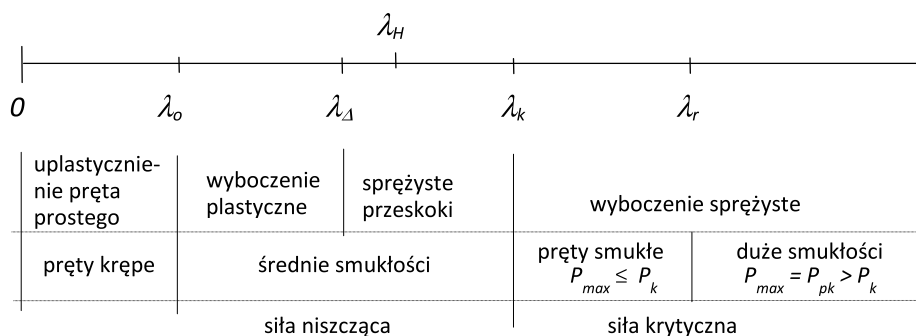


Rys.2. Wykresy ścieżek równowagi, aluminiowy płaskownik (średnie smukłości) $\lambda = 72,5$: a) $\sigma = \sigma(u)$, b) $P = P(t)$, $u = u(t)$, $f = f(t)$, P - obciążenie, u - przemieszczenie (zbliżenie końców pręta), f - strzałka ugięcia, $\sigma_c = P/A$ - naprężenie ściskające, $\sigma_g = M/W$ - naprężenie zginające, $M = P f$ - moment zginający, A - pole powierzchni przekroju, W - wskaźnik wytrzymałości przekroju. Linia przerywaną zaznaczono początek i koniec etapu przejściowego.

W zakresie średnich smukłości, w otoczeniu eulerowskiej granicznej smukłości λ_H , wyodrębniono przedział $\lambda_\Delta < \lambda < \lambda_k$, w którym utrata stateczności następuje w sposób dynamiczny. Towarzyszy jej przeskok siły i strzałki ugięcia: spadek siły $\Delta P > 0$ i wzrost strzałki ugięcia $\Delta f < 0$ i wzrost naprężenia w skrajnym ściskanym włóknie $\Delta \sigma > 0$. Przeskoki są widoczne na rys.2, w przypadku pręta aluminiowego o smukłości $\lambda = 72,5$ i granicy $R_{0,01} = 150\text{MPa}$.

Zjawisko przeskoku, które pojawia się w prętach średniej smukłości, jest efektem niestabilności położenia równowagi i jest związane ze zmianą etapu przejściowego w etap pręta ugiętego o osi nieściśliwej. Taka interpretacja zjawiska przeskoku jest oryginalnym osiągnięciem pracy.

Poniżej przedstawiono zaproponowaną klasyfikację smukłości prętów ściskanych.



Rys.3. Klasyfikacja smukłości prętów

1. Pręty krępe ($\lambda < \lambda_o$) ulegają zniszczeniu bez wyboczenia, przy zachowaniu kształtu pręta o osi prostoliniowej

Zakres średnich smukłości

2. Przedział odkształcenia plastycznego ($\lambda_o < \lambda < \lambda_\Delta$) - stan graniczny jest określony siłą niszczącą $P_n < P_k$, przy pełnym uplastycznieniu przekrojów.
3. Przedział sprężystych przeskoków ($\lambda_\Delta < \lambda < \lambda_k$) - stan graniczny jest określony maksymalną siłą, $P_n = P_\Delta < P_k$, po której następuje przeskok siły i strzałki ugięcia.

Pręty, które przenoszą siłę krytyczną

4. Pręty smukłe ($\lambda_k < \lambda < \lambda_r$) - siła krytyczna P_k w zakresie odkształcenia sprężystego, siła pokrytyczna $P_{pk} \leq P_k$.
5. Pręty dużych smukłości ($\lambda > \lambda_r$) - siła krytyczna P_k występuje w zakresie odkształcenia sprężystego, występuje efekt pokrytycznego zwiększenia nośności, $P_{pk} > P_k$.

gdzie: λ_o - smukłość, poniżej której wyboczenie nie występuje, λ_Δ - dolna graniczna smukłości przedziału sprężystych przeskoków, λ_k - dolna graniczna smukłość prętów, które przenoszą siłę krytyczną, λ_r - dolna graniczna smukłość prętów, które przenoszą siłę pokrytyczną, $P_{pk} > P_k$.

d) W pracy zweryfikowano definicję zachowania statecznego jako stanu, w którym układ zachowuje zdolność do odkształcenia sprężystego.

e) W pracy potwierdzono właściwości stanu krytycznego, które wynikają z przyjętego kryterium energii odkształcenia sprężystego.

- Potwierdzono prawidłowość definicji stanu krytycznego, określonego jako stan, w którym energia odkształcenia sprężystego przyjmuje wartość maksymalną, równą U_H oraz zanika zdolność pręta do odkształceń sprężystych.

- Potwierdzono związek pomiędzy energią zginania U_g , energią ściskania U_{sc} i maksymalną energią sprężystą U_H , w postaci zależności: $U_H = U_{sc} + 2 U_g$.

- W warunkach stanu krytycznego wyznaczono wartości strzałki ugięcia.

f) Elementem nowym, zaproponowanym w tej pracy jest, oprócz wyodrębnienia etapu przejściowego odkształceń pręta, określenie, że odkształcenie krytyczne ε_k pręta jest równe sumie odkształcenia podłużnego etapu pręta o osi prostoliniowej i etapu przejściowego. Na wykresach $P = P(u)$, $\varepsilon = \varepsilon(u)$, rys.1ci d, przejście do etapu przejściowego nie jest związane ze zmianą kąta nachylenia stycznej do krzywej wykresu. Ten wniosek stanowi jednocześnie potwierdzenie założenia dotyczącego nieściśliwości osi pręta w III etapie deformacji.

Obliczenia odkształceń krytycznych ε_k wykonano w całym zakresie smukłości objętym programem badań. Wyniki obliczeń wskazują, że wzór $\varepsilon_k = \pi^2 / \lambda^2$, jest ważny w przypadku prętów, które przenoszą siłę krytyczną. W przypadku tych smukłości przejście do postaci ugiętej pręta następuje w zakresie odkształcenia sprężystego.

g) W zakresie pokrytycznym, prętów które przenoszą siłę krytyczną, występuje efekt wzmocnienia materiału. Przyczyną wzmocnienia jest uplastycznienie, które pojawia się w warunkach stanu krytycznego, w całej objętości pręta. Badania potwierdziły, że w przypadku obciążenia w postaci przyrostów przemieszczenia pręty mogą wykazywać niezerową nośność nawet w zakresie pokrytycznym. W przypadku przeprowadzonego eksperymentu wzmocnienie objawiło się zwiększeniem długości przedziału przemieszczeń, w którym jest przenoszona siła o wartości bliskiej wartości siły krytycznej. Długość tego przedziału jest wprost proporcjonalna do smukłości. Wzmocnienie pokrytyczne ma istotne znaczenie przy określeniu odporności poawaryjnej konstrukcji.

Interpretacja wzmocnienia pokrytycznego jako efektu wynikającego z uplastycznienia całej objętości pręta będącego konsekwencją osiągnięcia maksymalnej wartości energii odkształcenia sprężystego (utrata zdolności do odkształcenia sprężystego pręta) jest nowym elementem w badaniach tego zjawiska.

W pracy wskazano, że w zakresie pokrytycznym, kształt ścieżki równowagi nie zależy od sposobu obciążenia. Jest taki sam w przypadku statycznego sterowania przyrostami przemieszczenia, jak i dynamicznego zniszczenia pręta, który utracił nośność wskutek obciążenia siłą przekraczającą wartość siły maksymalnej. Niekontrolowany proces zniszczenia próbki podczas powrotu głowicy maszyny wytrzymałościowej do położenia spoczynku, został zarejestrowany przez czujniki przemieszczenia. Wskazania czujników zaznaczono kółkami na rys.1b. Zarejestrowane wartości obciążenia pokazują, że zniszczona próbka, w zakresie pokrytycznym zachowała niezerową nośność.

h) Badania cykli odciążania i ponownego obciążania, we wszystkich przypadkach badanych prętów, ujawniły właściwość *pamięci punktu powrotu*. Po odciążeniu i powtórny obciążeniu pręt powraca do punktu ścieżki równowagi, z którego rozpoczęło się odciążanie. Punkty o współrzędnych (P_{pk}, u_{pk}) zaznaczono na rys.1a i b.

i) Weryfikację istotnych elementów proponowanej teorii umożliwiły pomiary tensometryczne odkształceń powierzchni bocznej pręta $\varepsilon = \varepsilon(t)$. Badania:

- potwierdziły prawidłowość założenia o nieściśliwości osi pręta w trzecim etapie deformacji,

- potwierdziły prawidłowość przyjęcia schematu statycznego pręta obustronnie swobodnie podpartego, którego długość jest równa odległości pomiędzy węzłami linii ugięcia,

- umożliwiły wizualizację zjawiska przeskoaku siły i strzałki ugięcia prętów średniej smukłości, w warunkach utraty stateczności.

j) Określono zmiany sztywności pręta ściskanego podczas obciążania.

Sztywność pręta ściskanego należy definiować w połączeniu z aktualnym rodzajem deformacji. Miarą sztywności pręta o postaci prostoliniowej jest moduł Younga. Podczas etapu przejściowego miarą sztywności jest nadal moduł Younga, co wynika z dominującego odkształcenia podłużnego. W końcowej części tego etapu coraz większy efekt zginania

powoduje zmniejszenie sztywności podłużnej, na wykresie $P = P(u)$, kąt nachylenia stycznej do krzywej wykresu maleje. Do analizy sztywności pręta ugiętego o osi nieściśliwej należy wykorzystać pojęcie sztywności kierunkowej, sztywności w kierunku działania siły ściskającej.

W przypadku obciążenia pręta siłą o stałym kierunku działania, zwiększenie obciążenia powoduje, że pręt zachowuje sztywność w kierunku działającej siły, ale zmniejszeniu uległa jego sztywność poprzeczna. Utrata stateczności jest spowodowana utratą sztywności poprzecznej pręta. Miarą sztywności poprzecznej jest częstotliwość drgań własnych ω . Wzrost obciążenia powoduje zmniejszanie wszystkich częstości drgań. Ten efekt jest związany przenoszeniem energii form wyższych do formy pierwszej, co opisano w następnej części referatu.

k) Określono wpływ zmian energii odkształcenia na przebieg procesu wyboczenia i utraty stateczności.

W przypadku pręta obciążonego siłą o stałym kierunku działania efekt zmniejszania częstości drgań jest związany z wygaszaniem wyższych form własnych i przenoszeniem energii form wyższych do formy pierwszej. Ostatecznie utrata stateczności ma miejsce przy częstości drgań równej zero, co odpowiada monotonicznemu, nieskończonej powolnemu wzrostowi strzałki ugięcia pierwszej formy własnej, utracie stateczności przez dywergencję.

W przypadku obciążenia siłą niezachowawczą lub pseudozachowawczą o zachowaniu statecznym decyduje nie tylko wartość energii odkształcenia sprężystego, ale również wartość energii, która jest dodana do układu poprzez obciążenie typu śledzącego. Dodana do układu energia powoduje zwiększenie sztywności pręta i wzrost pierwszej częstości drgań. Może być powodem wzmocnienia lub wygaszenia form własnych lub spowodować jakościową zmianę kształtu formy własnej, na kształt odpowiadający wyższemu poziomowi energetycznemu. Wartość siły krytycznej odpowiadająca wyższej formie własnej jest wielokrotnie wyższa niż siła krytyczna, która występuje z formą niższą.

W przypadku układu niezachowawczego, stały dopływ energii powoduje, że kształt formy pierwszej częstości drgań zbliża się do kształtu formy częstości drugiej. Utrata stateczności przez flutter ma miejsce, gdy kształt form dwóch pierwszych częstości jest identyczny.

W przypadku układu pseudozachowawczego dopływ energii ma miejsce w początkowym etapie obciążania, powoduje zwiększenie energii wewnętrznej i zmianę kształtu formy podstawowej na kształt odpowiadający wyższej formie własnej. Warunki podparcia pręta lub rodzaj obciążenia powodują, że od pewnego poziomu siły powstają warunki charakterystyczne dla układu zachowawczego. Ostatecznie układ traci stateczność przez dywergencję z wyższą formą własną i odpowiednio wyższą wartość siły krytycznej. Wyznaczono kształty form własnych odpowiadające charakterystycznym etapom obciążania układu niezachowawczego (kolumny Becka) i układu pseudozachowawczego (kolumna Tomskiego).

Oryginalnym osiągnięciem pracy jest wytłumaczenie zjawiska zmiany form własnych jako skutku energii dodanej do układu poprzez obciążenie typu śledzącego jest.

Zmianę formy podstawowej w formę wyższą poprzedza wygaszenie form wyższych częstości, jedyną aktywną formą pozostaje forma podstawowa. Przy obciążeniu P^* , częstość drgań własnych ω^* , pręta obciążonego uogólnioną siłą śledzącą, jest taka sama jak druga częstość drgań własnych pręta Eulera, konstrukcja wykazuje cechy układu zachowawczego. Parametry punktu zmiany formy własnej (P^*, ω^*) , są cechą konstrukcji. Są takie same zarówno dla prętów poddanych obciążeniu niezachowawczemu, pseudozachowawczemu jak i zachowawczemu. Ta obserwacja stanowi bardzo ważne rozwinięcie proponowanej teorii.

Propozycje ewentualnego wykorzystania proponowanych rozwiązań w dziedzinie poprawy bezpieczeństwa pracy konstrukcji w warunkach utraty stateczności.

a) Oryginalna koncepcja współczynnika bezpieczeństwa w ujęciu energetycznym

Wobec faktu, że stan krytyczny jest określony poziomem energii sprężystej, a nie poziomem naprężenia, w pracy zaproponowano metodę wyznaczania współczynnika bezpieczeństwa z uwzględnieniem pojęcia energii odkształcenia sprężystego. Warunek bezpiecznej eksploatacji konstrukcji sformułowano w postaci warunku energetycznego, a nie warunku naprężeniowego. Zaproponowano przyjęcie współczynnika bezpieczeństwa jako ilorazu energii sprężystej zgromadzonej w pręcie, U_S , do maksymalnej energii odkształcenia sprężystego U_H , $n = U_S / U_H$. Maksymalna wartość energii sprężystej, jaka może być zgromadzona w materiale pręta zależy od charakterystyk geometrycznych przekroju oraz cech wytrzymałościowych i mechanicznych materiału, jest określona wzorem $U_H = \frac{1}{2} \pi A i \sqrt{R_H^3 / E}$, gdzie: R_H – granica proporcjonalności, E – moduł Younga, i – promień bezwładności, A – pole powierzchni przekroju pręta. Zaproponowana postać współczynnika bezpieczeństwa określa jaką część energii maksymalnej U_H należy uwzględnić w projektowaniu aby zapewnić bezpieczną eksploatację konstrukcji.

Utrata stateczności jest zjawiskiem globalnym, dotyczy całej objętości pręta, nie tylko najbardziej naprężonego przekroju. Przyjęte w pracy kryterium energetyczne daje lepszą, niż w przypadku założeń normowych, ocenę zbliżenia stanu konstrukcji do stanu niebezpiecznego. Kryterium uwzględnia bowiem fakt, że zjawisko utraty stateczności jest zjawiskiem globalnym, a nie lokalnym, wynikającym z wyczerpania nośności przekroju najbardziej wyężonym. Należy zwrócić uwagę, że spełnienie warunku stanu krytycznego w postaci maksymalnej wartości energii sprężystej U_H , powoduje, że uplastycznienie materiału pręta może nastąpić przy naprężeniu mniejszym od granicy proporcjonalności. Takie zachowanie jest obserwowane w eksperymencie stateczności.

b) Propozycje rozwiązań konstrukcyjnych zapewniających realizację obciążenia w postaci siły uogólnionej

W pracy zamieszczono propozycje rozwiązań konstrukcyjnych, które zapewniają realizację obciążenia w postaci uogólnionej siły śledzącej. Takie rozwiązanie powoduje, że utrata stateczności następuje z wyższą formą własną i odpowiednio wyższą wartością siły krytycznej. Zaproponowane rozwiązania zapewniają zwiększenie nośności konstrukcji, mniejsze zużycie materiału i poprawę bezpieczeństwa jej użytkowania. Uwzględniono modyfikacje warunków podparcia słupów, które mogą być wykorzystane w inżynierii lądowej i wodnej jak również w rozwiązaniach konstrukcyjnych maszyn i pojazdów.

Problematyka zawarta w monografii była tematem zebranych poniżej publikacji i prezentacji konferencyjnych

A. Stateczność prętów przyzmatycznych

1. Imiełowski Szymon: Deformacje smukłych elementów konstrukcji mostowej w zakresie dokrytycznym, Roads and Bridges - Drogi i Mosty, 2019 /w druku/
2. Imiełowski Szymon: Sztywność ściskanych prętów przyzmatycznych w zakresie dokrytycznym, w: Wybrane zagadnienia konstrukcji i materiałów budowlanych oraz geotechniki / Dobiszewska M. (red.), 2015, Wyd. Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, ISBN 978-83-64235-73-3, ss. 63-68
3. Ziółkowski Andrzej, Imiełowski Szymon: Buckling and Post-buckling Behaviour of Prismatic Aluminium Columns Submitted to a Series of Compressive Loads, w: Experimental Mechanics, vol. 51, nr 8, 2011, ss. 1335-1345,
4. Imiełowski Szymon, Ajdukiewicz Cezary Witold, Glinicka Aniela Maria: Analiza eksperymentalna zachowań pokrytycznych na przykładzie ściskanych kolumn metalowych, w: Logistyka, nr 3, 2011, ss. 943-948
5. Imiełowski Szymon, Glinicka Aniela Maria, Ajdukiewicz Cezary Witold: Analiza eksperymentalna ścieżek wyoboczenia prętów ściskanych w przypadku obciążenia sterowanego przemieszczeniem, w: Budownictwo i Architektura, vol. 13, nr 2, 2014, ss. 209-214
6. Imiełowski Szymon: Sequence of deformation modes of compressed columns in case of nonconservative and conservative systems, 2015, 14th German-Polish Workshop on dynamical Problems in Mechanical Systems, Wandlitz, Niemcy 2015, referat wygłoszony
7. Imiełowski Szymon: Sztywność kierunkowa w analizie stateczności sciskanych prętów przyzmatycznych, 2013, 52 Sympozjon Modelowanie w Mechanice, Ustroń 2013, referat wygłoszony
8. Imiełowski Szymon, Odorowicz Jerzy, An original approach to buckling of beam/columns under conservative loading, 3rd International Conference on Integrity, Reliability & Failure, IRF'2009, Porto, Portugalia, 78-79, 20-24.07.2009

9. Imiełowski Szymon: Modal forms of columns subject to generalized follower force, w: Theoretical foundations of civil engineering. Polish-Ukrainian transactions / Szcześniak Waław Edward (red.), vol. 10, nr 1, 2, 2002, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISBN 5-7763-8880-5, ss. 141-150

B. Układy niezachowawcze i pseudozachowawcze

10. Imiełowski Szymon, R. Bogacz, Stability constraints in optimization of cracked columns subjected to compressive follower load, Engineering Transaction, v.55, z.4, 277-288, 2007

11. Imiełowski Szymon, R. Bogacz, W. Kurnik, Fixed point in frequency domain of structures subject to generalized follower force, Machine Dynamics Problems, v.25, 169-182, 2001

12. Bajer Czesław, Bogacz Roman, Imiełowski Szymon: Passive Control of a Beam Subject to Travelling Inertial Load, w: Engineering Transactions (Rozprawy inżynierskie), 2000, ss. 283-292

13. Bogacz Roman, Imiełowski Szymon, Tomski Lech: Stability and vibration of column structures subjected to generalized concentrated load. Theoretical and experimental study, w: Proc. of Int. Symposium on Dynamics of Continua., Bad Honnef, 9-13.09.1996; 45-54 również w: „Theoretical Foundations of Civil Engineering” Proc. of Ukrainian-Polish Seminar, Dnepropetrovsk, Warszawa, Czerwiec 1997, 453-462.

14. Imiełowski Szymon, Bogacz Roman: Coexistence of divergence and flutter features of nonconservative system on example of railway wheelset, w: Dynamical Problems in Mechanical Systems, Eds. R. Bogacz, G.P. Ostermayer i K. Popp. , 23-30, Warszawa 1996

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

a) Badania dotyczące zjawiska uderzenia hydraulicznego

Uderzenie hydrauliczne jest jednym z obciążeń wyjątkowych instalacji hydraulicznych. Zjawisko polega na gwałtownej zmianie ciśnienia cieczy lub gazu w przewodzie, np. wskutek szybkiego zamknięcia lub otwarcia zaworu, awarii pomp lub nagłego wyłączenia energii elektrycznej. Zjawisko jest bardzo niekorzystne i może wywołać zniszczenie w postaci uplastycznienia lub pęknięcia przewodu, rozszczelnienia połączeń pomiędzy elementami rurociągu, może być przyczyną nadmiernych drgań przewodu. W pracach zaprezentowano przykłady metod i urządzeń do zabezpieczenia konstrukcji przed skutkami uderzenia hydraulicznego oraz:

- Zaproponowano oryginalną metodę oceny efektywności urządzeń tłumiących falę uderzenia hydraulicznego. Metodę wykorzystano do porównania efektywności wybranych systemów ochrony przed uderzeniem hydraulicznym.

- Zaproponowano oryginalne rozwiązanie urządzenia do ochrony przed skutkami uderzenia hydraulicznego, w którym wykorzystano zasadę działania dynamicznego eliminatora drgań. Rozwiązanie jest zgłoszone do Urzędu Patentowego.

Wyniki badań wskazują, że zastosowanie dynamicznego eliminatora drgań w instalacji wodociągowej stanowi efektywne rozwiązanie zabezpieczające przed niekorzystnymi jego skutkami. Prawidłowo zaprojektowany eliminator skutecznie redukuje amplitudy maksymalne ciśnienia uderzenia hydraulicznego oraz skraca przebieg całego zjawiska. W artykułach przedstawiono założenia modelu obliczeniowego oraz rezultaty analizy numerycznej. Określono parametry dynamicznego eliminatora drgań. W Zakładzie Budownictwa Wodnego i Hydrauliki zbudowano prototypowe urządzenie i wykonano weryfikację eksperymentalną modelu eliminatora masowego.

Od września 2016 jestem promotorem pomocniczym doktoranta mgr inż. Bartosza Śniegockiego. Rozprawa pt. „Ocena możliwości tłumienia uderzenia hydraulicznego z wykorzystaniem dynamicznego eliminatora drgań”, jest realizowana na Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, promotorem pracy jest prof. dr hab. Marek Mitosek. Rozprawa jest zakończona i jest złożona do recenzji.

Drugą grupę badań tej części, stanowią badania wytrzymałościowe ścianek przewodów znajdujących się w warunkach uderzenia hydraulicznego. We współpracy z pracownikami Wydziału Inżynierii Lądowej, przeprowadzono serię badań laboratoryjnych, przy obciążeniu dynamicznym symulującym warunki uderzenia hydraulicznego.

- Określono zmiany modułu Younga materiałów stosowanych do produkcji przewodów hydraulicznych: polietylenów HDPE, MDPE i PCV, wywołanych obciążeniem falą uderzenia hydraulicznego.

Zestawienie publikacji i prezentacjach konferencyjnych dotyczących zjawiska uderzenia hydraulicznego

1. Kubrak Michał, Kodura Apoloniusz, Imiełowski Szymon Bogdan: Analysis of Pressure Wave Velocity in a Steel Pipeline with Inserted Fiber Optic Cable, w: Free Surface Flows and Transport Processes / Kalinowska Monika B., Mrokowska Magdalena Maria, Rowiński Paweł (red.), GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences, 2018, Springer International Publishing, ISBN 978-3-319-70913-0, ss. 281-292
2. Imiełowski Szymon Bogdan, Śniegocki Bartosz: Protection of pipeline Bridges against vibrations caused by a water hammer, w: Roads and Bridges – Drogi i Mosty, vol. 16, nr 1, 2017, ss.65-79,
3. Imiełowski Szymon Bogdan, Śniegocki Bartosz: Metody ochrony mostów rurociągowych przed skutkami uderzenia hydraulicznego, w: Czasopismo Inżynierii Lądowej i Wodnej, Środowiska i Architektury, JCEEA, vol. 64, nr 3/I, 2017, ss. 417-425, DOI:10.7862/rb.2017.134

4. Imiełowski Szymon Bogdan, Śniegocki Bartosz: Protection of pipeline Bridges against vibrations caused by a water hammer, w: Roads and Bridges – Drogi i Mosty, vol. 16, nr 1, 2017, ss.65-79, DOI:10.709/rabdim.017.005
5. Imiełowski Szymon, Kodura Apoloniusz, Glinicka Aniela Maria, Ajdukiewicz Cezary Witold: Experimental Study on Mechanical Properties of Polyethylene HDPE in Conditions of Hydraulic Impact Simulation, w: 26th Symposium on Experimental Mechanics of Solids. Selected, peer reviewed papers from the 26th Symposium / Pyrzanowski Paweł, Gadomski Jacek (red.), Solid State Phenomena, vol. 240, 2016, Tran Tech Publications Ltd, ISBN 978-3-03835-568-7, ss. 149-154, DOI:10.4028/www.scientific.net/SSP.240.149

b) Badania dotyczące nośności prętów skorodowanych

Słupy o przekrojach cienkościennych są często spotykanym elementem w konstrukcjach budowlanych, kolejowych i drogowych. Tematem tej grupy prac jest analiza nośności, osiowo ściskanych cienkościennych, skorodowanych słupów stalowych. Uwzględniono korozję powierzchniową rozmieszczoną równomiernie lub na wybranych obszarach powierzchni słupów. Ubytki masy spowodowane korozją zmniejszają przekrój poprzeczny słupa i wpływają na ich nośność. Do obliczeń wykorzystano teorię prętów cienkościennych. Modele obliczeniowe ubytków korozyjnych słupów przyjęto na podstawie obserwacji istniejących konstrukcji. Rozważano zwykle kilka modeli osłabienia ścianek ubytkami korozyjnymi, w przykładowo wybranych kształtownikach. Rozważania teoretyczne dotyczące zagadnienia stateczności skorodowanych ściskanych cienkościennych słupów zilustrowano w postaci wykresów zmian nośności wywołane ubytkami korozyjnymi słupów.

- W analizowanych przypadkach stwierdzono obniżenie nośności słupa na skutek jego korozji. Możliwa jest również zmiana postaci wyboczenia, np. z giętnej na giętno-skrętną. Zwykle bardziej niebezpieczny jest rozwój korozji powodujący niesymetryczny ubytek grubości, co może wpłynąć na zmianę postaci wyboczenia.

Zestawienie publikacji i prezentacjach konferencyjnych dotyczących nośności prętów skorodowanych

1. Glinicka Aniela Maria, Ajdukiewicz Cezary Witold, Imiełowski Szymon: Effects of uniformly distributed side corrosion on thin-walled open cross-section steel columns, w: Roads and Bridges - Drogi i Mosty, vol. 15, nr 4, 2016, ss. 257-270, DOI:10.7409/rabdim.016.016
2. Glinicka Aniela Maria, Imiełowski Szymon, Ajdukiewicz Cezary Witold: Influence of uniformly distributed corrosion on the compressive capacity of selected thin-walled metal columns, w: Procedia Engineering, vol. 111, 2015, ss. 262-268, DOI:10.1016/j.proeng.2015.07.087
3. Glinicka Aniela Maria, Imiełowski Szymon: Ocena zmian nośności słupów stalowych w ciągach komunikacyjnych na skutek korozji, w: Aktualne zagadnienia budownictwa komunikacyjnego, Wydanie Jubileuszowe z okazji 75-lecia Profesora Waclawa Szcześniaka,

Zbiciak Artur, Ataman Magdalena (red.), 2015, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, ISBN 978-83-7814-481, ss. 71-80

4. Glinicka Anieli Maria, Imiełowski Szymon: Wpływ zmiany przekroju poprzecznego skorodowanych prętów ściskanych na nośność, w: Logistyka, nr 4, 2015, ss. 3411-3416 CD 2

c) Publikacja dotycząca tematyki niezawodności konstrukcji

Artykuł jest związany z moją działalnością w Komitecie Technicznym ISO TC98 „Podstawy Projektowania Konstrukcji”.

1. Chmielewski Tadeusz, Imiełowski Szymon Bogdan: Podstawy projektowania kolejowych obiektów inżynierskich na podstawie oceny ryzyka i niezawodności wg norm ISO, w: Inżynieria kolejowa - szanse i wyzwania, materiały 64. Konferencji Naukowej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB Krynica 2018, Wyd. Politechniki Krakowskiej, ISBN 978-83-909811-5-4, ss.77-102

6. Informacja o dorobku dydaktycznym, popularyzatorskim, współpracy międzynarodowej i współpracy z jednostkami gospodarki jest zamieszczona w oddzielnym opracowaniu „Wykaz dorobku habilitacyjnego”

7. Zestawienie danych bibliometrycznych

Lp.	Rodzaj pracy	Liczba publikacji	P-ty MNiSW całość/mój udział	Sumaryczny IF
1	Czasopisma w bazie JCR	7	162 / 81,9	5,175
2	Publikacje w czasopismach wymienionych w bazie MNiSzW	22	174 / 98,73	
3	Rozdziały z serii książkowych	4	40 / 16,6	
4	Rozdziały w monografiach	2	20 / 4,5	
5	Publikacje jako materiały konferencyjne	5		
6	Podręcznik, skrypt, preskrypt	1 + 1 + 1	75 / 30	
7	Wygłoszone referaty na konferencjach krajowych (7), międzynarodowych (22)	27		
	Suma	43 + 27	471 / 231,7	

Artur Zbiciak