

Szymon IMIEŁOWSKI¹
Cezary AJDUKIEWICZ²
Aniela GLINICKA³

ANALIZA EKSPERYMENTALNA ZACHOWAŃ POKRYTYCZNYCH NA PRZYKŁADZIE ŚCISKANYCH KOLUMN METALOWYCH

Przedmiotem opracowania jest analiza eksperymentalna zachowania się ściskanych słupów w fazie dokrytycznej i w fazie pokrytycznej. Zachowanie się tych słupów zbadano w procesie obciążenia wzrastającego i obciążenia malejącego. Badano słupy stalowe i słupy ze stopu aluminium o kształcie prostokątnym, teowym i ceowym w przekroju poprzecznym. Badania eksperymentalne przeprowadzono wykorzystując maszynę wytrzymałościową INSTRON 8802, z której oprogramowania zastosowano proces obciążenia i odciążenia. W trakcie testów rejestrowano siłę P , zmianę odległości między uchwytami próbki – u i strzałkę ugięcia w połowie rozpiętości próbki - f . W efekcie końcowym przedstawiono eksperymentalny model zachowania się słupa w procesie obciążenia i w fazie pokrytycznej.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF POST-CRITICAL BEHAVIOR ON EXAMPLE OF METAL COLUMNS

The subject of the study is an experimental analysis of behavior of compressed columns in the pre and post- critical phase. The behavior of compressed columns were investigated in the loading and unloading process. There were studied steel and aluminum columns of rectangular, T and C shapes. The experimental study was conducted in testing machine INSTRON 8802 runs in a programmed loading and unloading processes. During the tests there were recorded the load - P , the change of distance between the jaws - u and the deflection in the middle of the span of the compressed rod - f . There was made an attempt to model the behavior of the compressed rod in the loading and unloading process.

1. WSTĘP

Bezpieczeństwo w transporcie w sposób istotny zależy od bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji pojazdów. Współczesne pojazdy konstruowane są w sposób

¹Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, 00-653 Warszawa; ul. Nowowiejska 20,
Tel. +48 22 234 74-09, e-mail: szymon.imielowski@is.pw.edu.pl

²Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, 00-637 Warszawa; ul. Armii Ludowej 16,
Tel. +48 22 234 57-54, e-mail: C.Ajdukiewicz@il.pw.edu.pl

³Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, 00-637 Warszawa; ul. Armii Ludowej 16,
Tel. +48 22 234 65-14, Fax.: +48 22 234 65-14, e-mail: A.Glinicka@il.pw.edu.pl

zapewniający osiągnięcie najlepszych walorów eksploatacyjnych przy zachowaniu możliwie najmniejszego ciężaru. Takie podejście powoduje konieczność redukcji przekrojów poprzecznych elementów. W konsekwencji badania stateczności elementów i bardziej złożonych struktur pozostają wciąż otwartym zadaniem w pracy projektanta.

W projekcie oryginalnej konstrukcji wymogi bezpieczeństwa narzucają konieczność weryfikacji na podstawie badań laboratoryjnych. Związane jest to z wieloma działaniami, które powinny być logicznie powiązane ze sobą, dobrze zaplanowane i zrealizowane w odpowiedniej kolejności. W ten sposób również planowanie i organizacja badań laboratoryjnych ma związek z działaniami logistycznymi w zakresie bezpieczeństwa transportu.

Zadaniem pierwszoplanowym jest tu przyjęcie do realizacji tematu badawczego, który formułuje się w oparciu o ustalone wcześniej potrzeby rozwoju danego fragmentu wiedzy zgodnego z potrzebami rozwoju współczesnej nauki i gospodarki. Następującym po nim działaniem jest zaplanowanie zamówienia i samo dostarczenie do laboratorium materiałów do badań np. tu kształtowników metalowych w pasmach o długościach dostępnych w hurtowni i odpowiednich do transportu oraz ich zmagazynowanie. Kolejnym działaniem jest wykonanie z tych materiałów modeli do badań. Przystosowanie modeli do badań jest związane z możliwościami pomiarowymi na danym stanowisku badawczym, tzn. z ich wymiarami geometrycznymi jako obiektu np. ustawionego na trawersie maszyny czy na stendzie oraz z odpowiednim i czytelnym przy dalszej interpretacji wyników mocowaniem modeli na tym stanowisku. Określenie i utworzenie dobrego stanowiska badawczego to bardzo istotne zagadnienie, które wymaga od osoby odpowiedzialnej za eksperyment wiedzy czasem z kilku obszarów, np. z mechaniki, z teorii pomiarów, z programowania oraz obsługi komputera. Współczesne maszyny wytrzymałościowe są sterowane elektronicznie, tzn. współpracują z komputerem. Możliwe jest sterowanie przemieszczeniem, odkształceniem i naprężeniem, a wybór tego wymaga specjalistycznej wiedzy. Maszyna jest uruchamiana poprzez odpowiedni program komputerowy i sterowana przez inny program komputerowy. Wobec tego, żeby prowadzić pomiary w maszynie trzeba przy użyciu oprogramowania maszyny zaplanować „metodę badawczą”. Obok samej maszyny na stanowisku badawczym wstępują urządzenia pomiarowe, które mogą z nią współpracować. Np. z maszyną wytrzymałościową INSTRON 8802 mogą współpracować czujniki do pomiaru odkształceń, czujniki do pomiaru przemieszczeń i system optyczny do pomiaru pól przemieszczeń. Dobre zastosowanie tych wszystkich urządzeń do konkretnego badania zależy od wiedzy eksperymentatora. Powinien on przynajmniej częściowo przewidzieć przebieg eksperymentu, po to aby wybrać właściwe zakresy pomiarowe tych urządzeń. Po przeprowadzeniu eksperymentu należy przeprowadzić analizę i interpretację wyników badań. Często jest to związane z przeniesieniem zbiorów wartości pomiarów z oprogramowania maszyny wytrzymałościowej do innego oprogramowania np. do Excela, programu graficznego itd. Taka czynność nieraz jest też związana z selekcją pewnej zbyt dużej liczby danych. Sama interpretacja wyników badań jest prowadzona w sposób odpowiadający naukowej analizie badanego zagadnienia określonego jako pierwszoplanowe.

Zatem nowoczesne laboratorium do badań mechanicznych to nie to samo co laboratorium tego typu pięćdziesiąt lat temu.

W dalszym ciągu niniejszej pracy jako przykład przedstawiono badania eksperymentalne wybożenia prętów metalowych przeprowadzone w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE WYBOCZENIA PRĘTÓW

2.1 Wprowadzenie

W fazie pokrytycznej słupy metalowe nie tracą całkowicie swojej nośności (metale są na ogół materiałami ciągliwymi, a nie kruchymi). Faza pokrytyczna charakteryzuje się obciążeniem mniejszym od obciążenia krytycznego i przemieszczeniem większym od tego, które odpowiada sile krytycznej. Załóżmy układ słupów przenoszący obciążenie stropu. Nastąpiła utrata nośności tylko jednego słupa. Ze względu na obecność pozostałych słupów obciążenie przekazywane przez strop na ten słup, który uległ wybożeniu zadawane jest jako przyrastające przemieszczenie. W tym przypadku możemy mówić o zdolności słupa do pewnej nośności pokrytycznej. W maszynie wytrzymałościowej taki stan obciążenia realizowany jest przez zadawanie siły ściskającej na pręt (słup) poprzez sterowanie przemieszczeniem. Realizowany plan eksperymentu przewiduje badania zachowania się pokrytycznego słupów metalowych o różnych przekrojach poprzecznych stosowanych w budownictwie. Typowe przekroje poprzeczne słupów stosowanych w konstrukcjach budowlanych pokazano na rys. 1. Spośród nich wybrano dwa jako przykłady do niniejszej pracy. W dalszym ciągu przedstawiono opis i wyniki badań doświadczalnych.



Rys. 1. Pręty metalowe o różnych przekrojach poprzecznych przeznaczone do badań

2.2 Badania doświadczalne

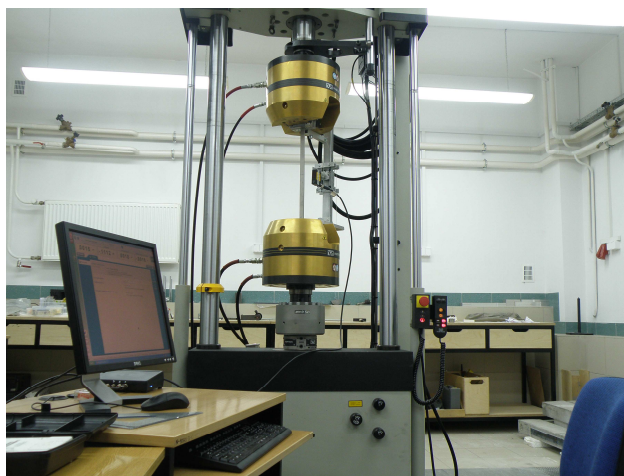
Badania eksperymentalne przeprowadzono w hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej Intron 8802 [1]. Maszyna jest wyposażona w stalowe głowice i w

siłownik, które są dostosowane do przenoszenia maksymalnego obciążenia osiowego równego 250 kN. Możliwa jest ich podwójna akcja, tj. przemieszczanie się w górę i w dół wzdłuż osi maszyny z maksymalną prędkością $v=3\text{m/min}=50\text{ mm/s}$. Siłownik hydrauliczny jest zamontowany na ramie do obciążania. Maszyna jest połączona z urządzeniem nadającym napęd hydrauliczny i zawierającym zbiornik oleju; maksymalny wydatek oleju jest 118 l/min. Maszyna jest sterowana przez elektroniczny system kontrolny (Fast Track 8800 Tower Controller). Podstawowym oprogramowaniem, który umożliwia jej uruchomienie jest pakiet Console [2]. Do zrealizowania zaplanowanego programu pomiarów w maszynie stosuje się kolejne oprogramowanie lub oprogramowania (w zależności od stopnia złożoności eksperymentu). Trzeba tu nadmienić, że dokładność pomiaru siły wynosi 1 kN, a dokładność pomiaru przemieszczenia głowic wynosi 0,05 mm.

W niniejszej pracy stanowisko badawcze było złożone z następujących urządzeń:

1. maszyny Instron 8802,
2. specjalnego oprzyrządowania umożliwiającego pomiar ugięcia zawsze w połowie długości próbki ściskanej,
3. dodatkowego urządzenia elektronicznego do rejestracji wyżej wymienionego pomiaru połączonego z systemem Fast Track 8800 Tower Controller.

W ten sposób jednocześnie można było przy każdym kroku obciążenia P zarejestrować strzałkę ugięcia f i przemieszczenie pionowe słupa ściskanego u . Na rys. 2 zilustrowano stanowisko badawcze.

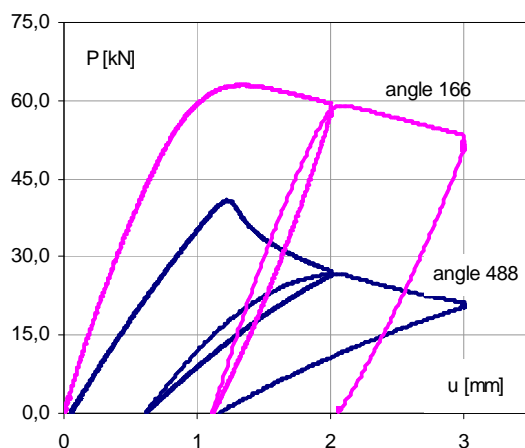


Rys. 2. Stanowisko badawcze (widoczna próbka ściskana)

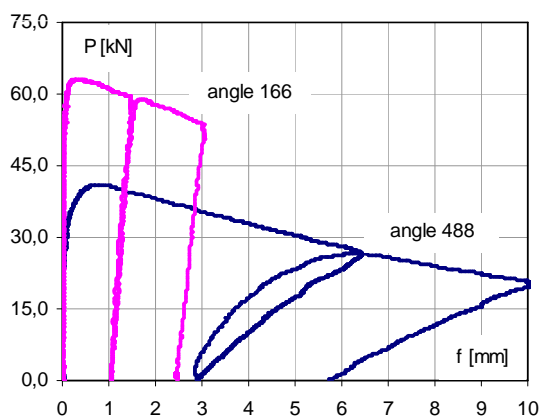
Wszystkie próbki ściskane były montowane w szczękach maszyny w taki sposób, żeby odpowiadało to pełnemu utwierdzeniu.

Poniżej przedstawiono wyniki uzyskane z pomiarów na próbkach stalowych (stal 1.4301 zgodnie z normą EN10088) o przekroju poprzecznym w kształcie kątownika 20x10x3 i dwóch długościach wynoszących 166 i 488 mm. Smukłość efektywna tych słupów odpowiednio wynosi 22 i 66 [3]. Wyniki pomiarów zarejestrowano w pełnym ich zakresie,

tj. w fazie dokrytycznej i pokrytycznej. Ponadto zastosowano obciążenie cykliczne w fazie pokrytycznej. Na rys. 3 i 4 przedstawiono wyniki pomiarów.



Rys. 3. Eksperymentalne zależności siła – przemieszczenie ($P - u$)



Rys. 4. Eksperymentalne zależności siła – strzałka ugięcia ($P - f$)

Analizując wykresy $P - u$ widzimy, że w pierwszej fazie są one liniowe, a nieliniowa faza pokrytyczna następuje po osiągnięciu przez próbkę nośności P_{max} . W fazie pokrytycznej zastosowano odciążenie od pewnego poziomu siły P do poziomu $P=0$ i ponowne jej obciążenie do tego samego poziomu siły P . W tym procesie nastąpił powrót na tę samą ścieżkę równowagi statycznej. Analizując wykresy $P - f$ widzimy, że w pierwszej fazie

ugięcie f nie pojawia się (słup jest prosty). Wygięcie słupa pojawia się przy sile $P < P_{max}$ i stosunkowo bliskiej P_{max} . W dalszym ciągu przebiegu tego procesu występuje faza pokrytyczna, która jest nieliniowa; przy obciążeniu cyklicznym następuje także powrót na tę samą ścieżkę równowagi statycznej. Jak widać z obu wykresów przedstawionych na rys. 3 i 4 skrócenie próbki następuje już od początku, a więc wyprzedza pojawienie się wygięcia.

3. WNIOSKI

Przeprowadzony, w pełni kontrolowany, test ściskania słupów metalowych dostarcza wyników, które umożliwiają opis szczegółowego zachowania się słupów w fazie dokrytycznej i pokrytycznej. W rezultacie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że skrócenie pręta występuje od początku procesu obciążenia, a wygięcie następuje później przy pewnym poziomie obciążenia $P < P_{max}$.

Taki rezultat eksperymentalny jest możliwy tylko przy wykorzystaniu współczesnych technik pomiarowych (na nie sterowanych maszynach wytrzymałościowych takich wyników nie otrzyma się). Jednocześnie trzeba nadmienić, że przeprowadzenie takich eksperymentów wymaga wiedzy zarówno z mechaniki jak i wiedzy z zakresu sterowania tymi maszynami. Uzyskane wyniki pozwalają na dokładne poznanie procesu ściskania słupów i mogą być przydatne przy wymiarowaniu z uwzględnieniem bezpieczeństwa.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Instron Reference Manual – Equipment: *Instron and ITS 3690 Series Servohydraulic Actuator*. M21-10003-EN, Revision C, 2003.
- [2] Instron Software Reference Manual: *Intron console Software version 8.1 Onwards*. M22-15283-EN, Revision B, 2007.
- [3] Bazant Z. P., Cedolin L.: *Stability of structures: elastic, inelastic, fracture and damage theories*. (2003) Dover Publications, ISBN 0-486-42568-1.