

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Michał Stopel

PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI MECHANICZNYCH PODDANYCH DZIAŁANIU OBCIĄŻEŃ NARASTAJĄCYCH Z DUŻĄ PRĘDKOŚCIĄ



PROMOTOR

DR HAB. INŻ. DARIUSZ SKIBICKI

PROMOTOR POMOCNICZY

DR INŻ. ARTUR CICHĄŃSKI

1. Uzasadnienie wyboru tematu

Uwzględnienie wpływu prędkości odkształcenia na właściwości mechaniczne materiałów jest konieczne w procesie projektowania maszyn i urządzeń, poddanych odkształceniom narastającym z dużą prędkością. Umacnianie się materiału pod wpływem prędkości odkształcenia może oddziaływać w sposób zarówno pożądany jak i niepożądany. W pierwszym przypadku wpływ prędkości może być wykorzystany do projektowania obiektów technicznych, w których zależy nam na zwiększeniu ich wytrzymałości podczas ich eksploatacji w takich warunkach. Są to na przykład kamizelki kuloodporne lub opancerzenia pojazdów. W drugim przypadku zjawisko to może być niepożądane dla takich typów urządzeń jak infrastruktura drogowa, elementy pojazdów pochłaniające energię zderzenia lub sprzęgła bezpieczeństwa. Nieuwzględnienie w takich warunkach wzrostu wytrzymałości może skutkować nieprawidłowym działaniem projektowanej konstrukcji.

W celu określenia wpływu prędkości odkształcenia na zachowanie się konstrukcji powszechnie stosuje się badania eksperymentalne. Coraz częściej jednak, ze względu na bardzo wysokie koszty badania niszczące prowadzone dla całych obiektów, wspomaga się analizami numerycznymi Metodą Elementów Skończonych (MES). Na potrzeby takich analiz opracowane zostały środowiska numeryczne takie jak np.: LS-Dyna, Abaqus Explicite czy Ansys Autodyn. W programach tych zaimplementowano modele materiałowe uwzględniające wpływ prędkości na właściwości materiałowe.

Jednym z obiektów technicznych narażonych na niepożądany wpływ prędkości odkształcenia, w przypadku, których badania niszczące wiążą się ze znacznymi kosztami, są konstrukcje wsporcze infrastruktury drogowej spełniające wymagania normy PN-EN 12767 pt. „Bierne bezpieczeństwo konstrukcji wsporczych dla urządzeń drogowych – wymagania i metody badań” w zakresie bezpieczeństwa biernego (RYS. 1).

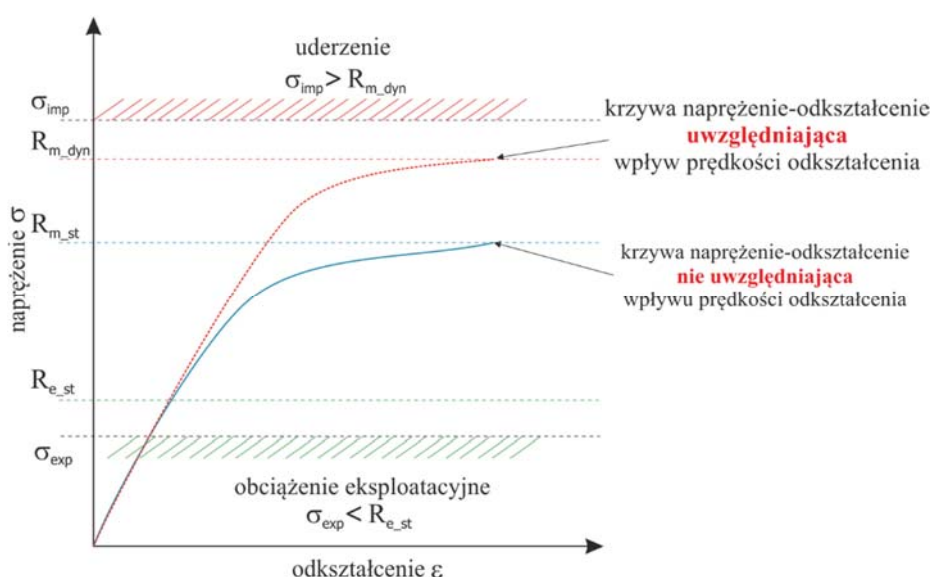


RYS. 1. Bramownica stanowiąca konstrukcję wsporczą infrastruktury drogowej (TIOMAN sp. z o.o.)

We współpracy z firmą Tioman Sp. z o.o. podjęto na Wydziale Inżynierii Mechanicznej UTP działania mające na celu zaprojektowania rodziny konstrukcji wsporczych, która spełniałaby wymagania stawiane w cytowanej normie. Wspólne działania polegały na: opracowaniu projektów konstrukcji wsporczych wchodzących w skład rodziny produktów firmy, przygotowaniu planu eksperymentu polegającego na zderzeniu pojazdu z wybraną i wykonaną konstrukcją oraz na

przygotowaniu symulacji numerycznych z zastosowaniem metody elementów skończonych do oceny pozostałych produktów z rodziny w celu zmniejszenia kosztów związanych z prowadzeniem badań eksperymentalnych dla każdej nowej konstrukcji.

Konstrukcja wchodząca w skład rozważanej rodziny spełniającej wymagania normy PN-EN 12767 składa się przede wszystkim z masztu osadzonego na podstawie przytwierdzonej do fundamentu. Maszt z podstawą połączony jest za pomocą złącza, które pełni dwie funkcje. Z jednej strony, złącze musi przenieść obciążenia wynikające z warunków eksploatacji, takie jak ciężar własny, napór wiatru lub ciężar pokrywy śnieżnej. Wymaga się wówczas, aby naprężenie eksploatacyjne σ_{exp} było mniejsze od naprężeń dopuszczalnych $\sigma_{exp} < \frac{R_{e_st}}{x}$ (gdzie: R_{e_st} – granica plastyczności, x – wsp. bezpieczeństwa) (RYS. 2). Z drugiej strony złącze nie może być zbyt wytrzymałe, tak, aby w wyniku uderzenia pojazdu w konstrukcję nastąpiło rozłączenie się stopy masztu od podstawy utwierdzonej w fundamencie. Naprężenia w złączu podczas uderzenia σ_{imp} muszą być większe od dynamicznej granicy wytrzymałości R_{m_dyn} .



RYS. 2. Obciążenie robocze złącza bezpieczeństwa

W przypadku projektowania konstrukcji o tak zdefiniowanych wymaganiach bezpieczeństwa uwzględnienie wpływu prędkości na wzrost wytrzymałości elementów złącza jest niezbędne. Ponadto dysponując adekwatnym modelem numerycznym podczas projektowania można zmniejszyć współczynnik bezpieczeństwa, który jest miarą niewiedzy nt. właściwości materiału i działających obciążeń. Należy jednak zaznaczyć, że właściwe przygotowanie modeli numerycznych silnie zależy od wykorzystanego modelu plastyczności, przyjętych współczynników tarcia, opisu kontaktów pomiędzy węzłami modelu czy kryteriów pęknięcia. Dzięki uwzględnieniu w analizie MES szeregu zjawisk wpływających na właściwości użytego materiału i węzłów konstrukcji można projektować obiekty nieprzewymiarowane.

2. Sformułowanie celu rozprawy

Jako cel rozprawy przyjęto opracowanie metod pozwalających w możliwie niedrogi i szybki sposób, dla modelu materiałowego Johnsona-Cook'a wyznaczyć a) współczynnik wrażliwości materiału na prędkość odkształcenia, b) współczynnik wpływu prędkości odkształcenia na uszkodzenie.

Realizacja celu głównego wiązała się z koniecznością podziału prac na pięć zadań:

1. Wyznaczenie stałych modelu Johnsona-Cooka z zastosowaniem dotychczas najczęściej stosowanej metodyki.
2. Zweryfikowanie poprawności sposobu modelowania MES, w którym zastosowano model materiałowy Johnsona-Cooka.
3. Sformułowanie własnej metodyki wyznaczania parametru wrażliwości umocnienia na prędkość odkształcenia w modelu Johnsona-Cooka.
4. Sformułowanie własnej metodyki wyznaczania parametru wrażliwości uszkodzenia na prędkość odkształcenia w modelu Johnsona-Cooka.
5. Realizacja badań aplikacyjnych na obiekcie rzeczywistym i ich symulacji MES z zastosowaniem stałych modelu wyznaczonych wg opracowanej hybrydowej metodyki wyznaczania stałych modelu Johnsona-Cooka.

3. Przedstawienie zakresu pracy

Praca podzielona została na zasadniczych 5 rozdziałów.

W punkcie pierwszym omówiono genezę prowadzonych badań oraz zarysowano problem badawczy niniejszej rozprawy.

W rozdziale drugim dokonano przeglądu stanu wiedzy na temat zmian właściwości materiału podczas narastania prędkości odkształcenia. W podrozdziale 2.1 omówiono zagadnienia związane ze sprężystym i plastycznym odkształceniem metali. W ramach tego punktu zaprezentowano również przegląd matematycznych modeli plastyczności materiału. W podrozdziale 2.2 zebrano zagadnienia związane z ciągłym pękaniem metali oraz przedstawiono wybrane modele matematyczne uwzględniające uszkodzenie materiału.

W rozdziale trzecim zaprezentowano własną metodykę badawczą, mającą na celu wyznaczenie stałych materiałowych dla analizowanego modelu matematycznego. Przedstawiono przesłanki do opracowania własnej hybrydowej metodyki badawczej mającej na celu wyznaczenie parametrów wrażliwości materiału na prędkość odkształcenia modelu uszkodzenia i plastyczności Johnsona-Cooka.

Rozdział czwarty zawiera opis badań aplikacyjnych. W ramach tego rozdziału przedstawiono warunki techniczne prowadzenia testu zderzeniowego pojazdu z infrastrukturą drogową oraz opisano przeprowadzony eksperyment zderzeniowy. Następnie przedstawiono symulację numeryczną metodą elementów skończonych z zastosowaniem modelu materiałowego uwzględniającego wpływ prędkości odkształcenia na zachowanie się konstrukcji.

Cała praca podsumowana została w rozdziale piątym, w którym sformułowano wnioski poznawcze i użytkowe oraz zaprezentowano przesłanki dla prowadzenia dalszych badań.

4. Analiza stanu wiedzy

W części pierwszej analizy stanu wiedzy skupiono się na rozpoznaniu zjawiska plastyczności materiałów oraz występujących w literaturze matematycznych modeli plastyczności opisujących to zjawisko. Modele te podzielić można w ogólności na 6 grup głównych, różniących się między sobą parametrami, jakie te modele pozwalają wziąć pod uwagę. W pracy opisano każdą z tych grup ze wskazaniem cech wyróżniających oraz wskazano, które modele mają zastosowanie w przypadku rozwiązywania wspomnianych we wstępie pracy problemów inżynierskich.

Następnie podobną analizę wykonano w odniesieniu do zjawiska uszkodzenia materiału oraz opisujących to modeli matematycznych z uwzględnieniem wpływu prędkości odkształcenia i temperatury na wartość odkształcenia w momencie zerwania próbki.

Część trzecią stanowi opis wybranych aspektów dotyczących modelu materiałowego Johnsona-Cooka w tym uzasadnienie wyboru tego modelu materiałowego do dalszych rozważań oraz do wykorzystania w trakcie opracowywania symulacji numerycznej testu zderzeniowego. W tej części ujęto również charakterystykę badań eksperymentalnych pozwalających określić właściwości materiałowe w warunkach odkształcenia z dużą prędkością.

Łącznie w pracy ujęto 121 pozycji literaturowych, głównie anglojęzycznych z okresu ostatnich dziesięciu lat.

5. Model materiałowy Johnsona-Cooka

Model plastyczności J-C

Model plastyczności zaprezentowany przez G. R. Johnsona i W. H. Cooka określa wartość naprężenia plastycznego jako iloczyn trzech funkcji. Pierwsza funkcja opisuje krzywą umocnienia o charakterze potęgowym. Argumentem funkcji jest wartość odkształcenia plastycznego. Druga jest funkcją wpływu prędkości odkształcenia na wartość umocnienia. Argumentem tej funkcji jest iloraz prędkości odkształcenia do prędkości przy obciążeniu quasi-statycznym. Trzecia natomiast opisuje osłabiający wpływ temperatury:

$$\sigma_y = (A + B \cdot \varepsilon_p^n) \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^C (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

gdzie: A – granica sprężystości, B – moduł umocnienia odkształceniowego, n – wykładnik umocnienia odkształceniowego, C – współczynnik wrażliwości na prędkość odkształcenia, $\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$ – iloraz prędkość odkształcenia w warunkach dynamicznych do prędkości odkształcenia w próbie quasi-statycznej, m – wykładnik osłabienia termicznego, $T^* = \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)$ – temperatura homologiczna, T_{room} – temperatura pokojowa, T_{melt} – temperatura topnienia.

Model uszkodzenia J-C

Model uszkodzenia Johnsona-Cooka uwzględnia oprócz prędkości odkształcenia i temperatury wpływ trójosiowości stanu naprężenia. Jest to model kumulacyjny, w którym uszkodzenie zdefiniowane jest jako:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_f} \quad (2)$$

gdzie: $\Delta \varepsilon$ – jest przyrostem ekwiwalentnego odkształcenia plastycznego, natomiast odkształcenie ε_f obliczane jest wg formuły:

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)) \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{04}}\right)^{D_4} (1 + D_5 T^*) \quad (3)$$

gdzie: σ^* – współczynnik trójosiowości stanu naprężenia, $\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$ – iloraz prędkość odkształcenia w warunkach dynamicznych do prędkości odkształcenia w próbie quasi-statycznej, T^* – temperatura homologiczna, $D_1 \div D_5$ – stałe materiałowe.

6. Program badań

Program badań zakładał rozdzielenie prac na trzy etapy.

1. Badania wstępne – obejmowały one wykonanie prób z zakresu badań dynamicznych oraz statycznych stosowanych zwyczajowo w celu wyznaczenia stałych modelu Johnsona Cooka. W ramach tych badań wykonano próbę statycznego ściskania, statycznego rozciągania oraz próby dynamicznego ściskania z zastosowaniem dzielonego pręta Hopkinsona. Blok ten zakończono weryfikacją przyjętego sposobu modelowania MES w oparciu o odwzorowanie przeprowadzonych badań w symulacjach numerycznych z zastosowaniem modelu materiałowego Johnsona-Cooka, w którym użyto opracowane w badaniach wstępnych stałe.
2. Badania zasadnicze – obejmowały swoim zakresem wyznaczenie stałych modelu plastyczności i uszkodzenia Johnsona-Cook'a w oparciu o zaproponowaną autorską hybrydową metodykę z zastosowaniem młota Charpy'ego oraz symulacji MES.
3. Badania aplikacyjne – polegały na wykonaniu symulacji numerycznej testu zderzeniowego projektowanej konstrukcji wsporczej infrastruktury drogowej oraz realizacji eksperymentu pozwalającego na poprawną walidację obliczeń numerycznych.

Wszystkie próbki do badań wstępnych i zasadniczych wykonane zostały z elementów w stanowiących złącze bezpieczeństwa masztu tj. z rdzenia śruby M16 klasy 6.8. W celu określenia gatunku stali wykonano analizę składu chemicznego. Przeprowadzone badanie wykazało, że śruby wykonane zostały ze stali 1.1178 (C30E)

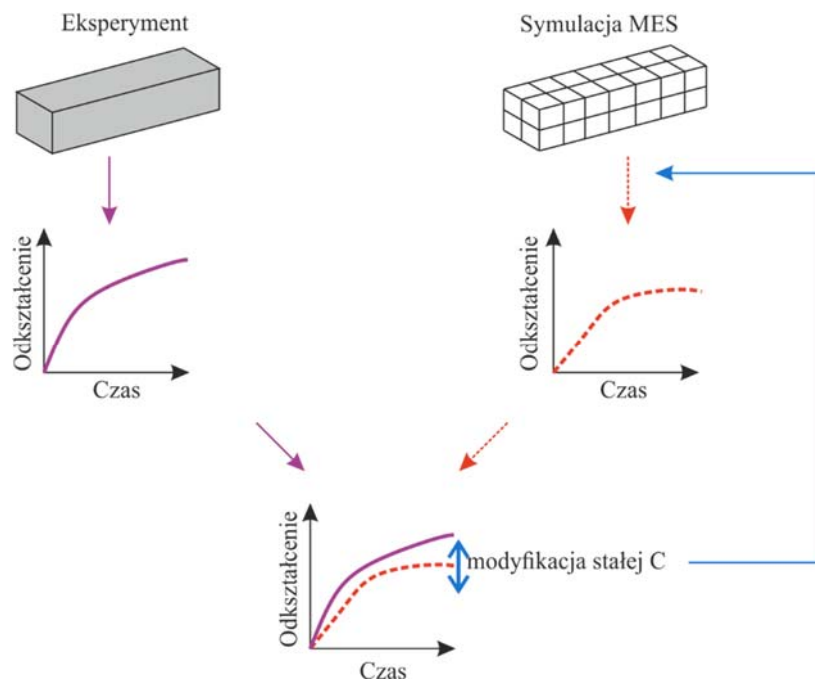
7. Opracowana hybrydowa metodyka wyznaczania stałych modelu plastyczności Johnsona-Cooka

Metoda wyznaczania parametru C modelu plastyczności J-C (1) wymaga przeprowadzenia testów na młocie Charpy'ego na próbkach bez karbu oraz wykonania obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych symulujących proces odkształcenia próbki na młocie. Metoda zakłada iteracyjny sposób wyznaczania wartości stałej. W każdej iteracji dokonuje się modyfikacji parametru C dążąc do uzyskania wykresu zależności wartości odkształcenia od stałej C₄. Za miarę jakości rozwiązania numerycznego przyjęto kryterium zbieżności w postaci:

$$\min \left[\sum_{i=1}^m (y_i^{obl.} - y_i^{eksp.})^2 \right] \leq \varepsilon_{dop} \quad (4)$$

gdzie: $y_i^{obl.}$ – wartość odkształcenia obliczeniowa, $y_i^{eksp.}$ – wartość odkształcenia wyznaczona eksperymentalnie, ε_{dop} – wartość dopuszczalna.

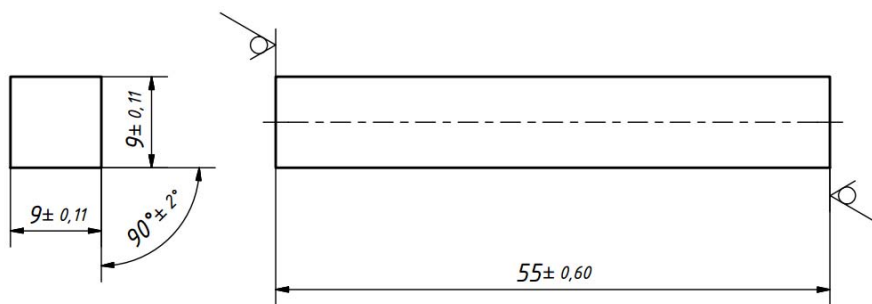
Metodę w sposób schematyczny zilustrowano na Rys. 3.



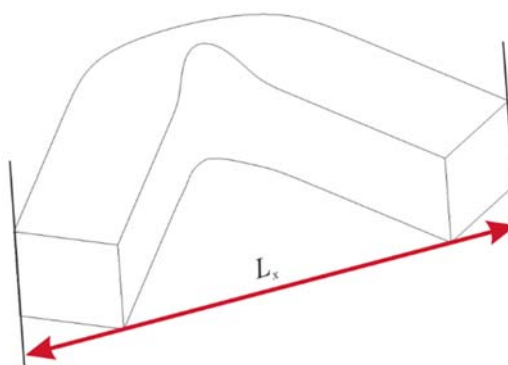
RYS. 3. Schemat proponowanej metodyki wyznaczania stałej wrażliwości na prędkość odkształcenia

Rejestracja danych

Istotnym aspektem przedstawionej metodyki jest możliwie dokładny, prosty i niezasochłonny pomiar odkształcenia próbki. Właściwy dla prezentowanej metodyki sposób pomiaru odkształcenia polega na pomiarze wymiaru L_x (Rys. 5) próbki po zakończeniu próby Charpy'ego. Jego początkowa wartość wynosi 55 mm i wynikała z długości próbki L (Rys. 4).



RYS. 4. Geometria próbki



RYS. 5. Miejsce pomiaru próbki po przeprowadzeniu próby

Pomiar pozwala na wyznaczenie składowej odkształcenia w płaszczyźnie równoległej do czoła próbki według wzoru.

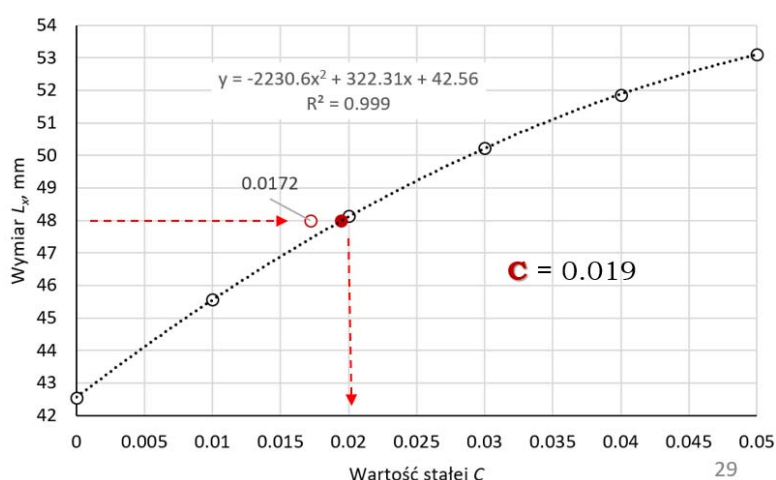
$$\varepsilon_x = (L - L_x)/L = dL_x/L \quad (4)$$

gdzie: L – odległość początkowa pomiędzy znacznikami, L_x – odległość pomiędzy znacznikami w trakcie próby, dL_x – przyrost odległości.

W podobny sposób dokonuje się pomiaru wartości L_x próbek odkształconych w symulacji numerycznej. Symulację wykonuje się z różnymi wartościami stałej C_4 tak aby uzyskać wykres zależności wymiaru L_x od parametru C_4 . Przykładowy wykres tej zależności przedstawiono na Rys. 6.

Wyznaczanie parametru C_4 modelu plastyczności modelu J-C

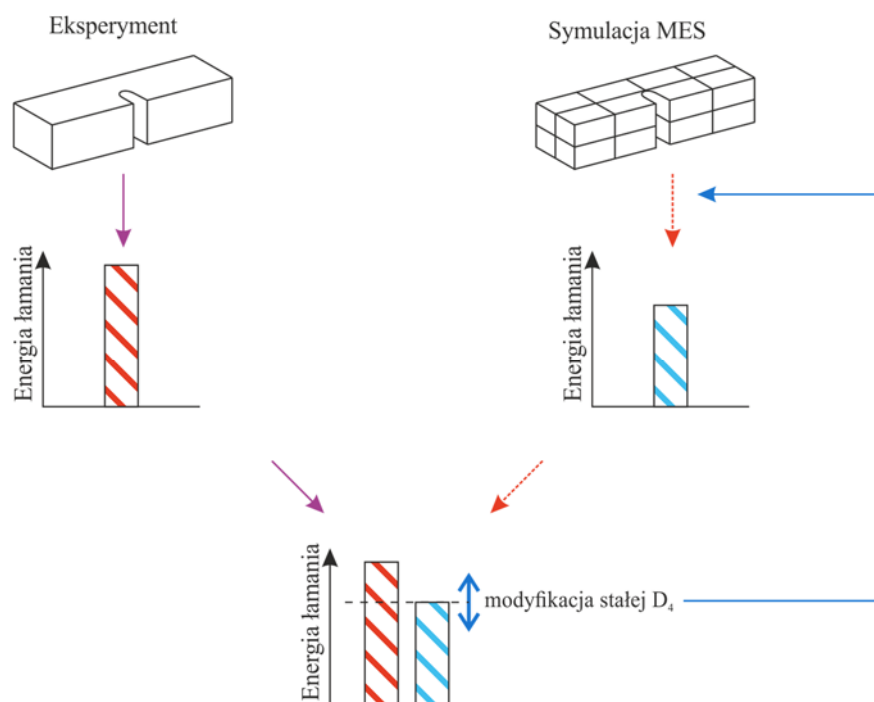
Wskazania właściwej wartości stałej wrażliwości na prędkość odkształcenia modelu plastyczności Johnsona-Cooka dokonuje się w oparciu o utworzony z zastosowaniem symulacji wykres zależności o którym była mowa wcześniej. Należy w pierwszym kroku oznaczyć linię na osi rzędnych odpowiadającą wymiarowi L_x wyznaczonemu na podstawie badań eksperymentalnych następnie odnaleźć punkt przecięcia tej linii z linią aproksymującą punkty będące wynikami symulacji. Znajdąc punkt przecięcia wspomnianych linii na osi odciętych należy odczytać właściwą dla badanego materiału wartość parametru C_4 (Rys. 6).



RYS. 6. Zależność wymiaru L_x od wartości parametru C_4

8. Opracowana hybrydowa metodyka wyznaczania stałych modelu uszkodzenia Johnsona-Cooka

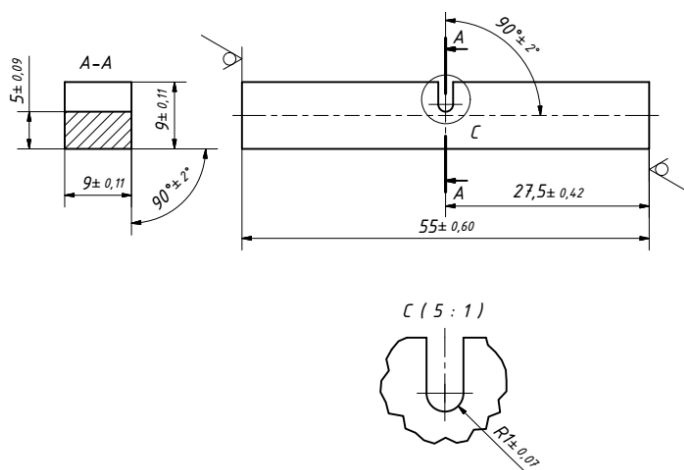
Metoda wyznaczania parametru D_4 modelu uszkodzenia Johnsona-Cooka polega na wykonaniu testu Charpy'ego z zastosowaniem próbki z karbem typu „U” oraz serii obliczeń metodą elementów skończonych symulujących tę próbę. W każdej iteracji dokonuje się modyfikacji stałej D_4 dążąc do uzyskania wykresu zależności wartości energii kinetycznej niezbędnej do złamania próbki w próbie Charpy'ego od wartości stałej D_4 . Metodę w sposób schematyczny zilustrowano na Rys. 7.



RYS. 7. Schemat ideowy metody wyznaczania parametru D_4 modelu uszkodzenia Johnsona-Cooka

Rejestracja danych

Zastosowanie podstawowego Młota Charpy'ego pozwala odczytać wartość energii kinetycznej zużytej w celu złamania próbki. W trakcie eksperymentu należy zastosować próbki z karbem o geometrii przedstawionej na Rys. 8.



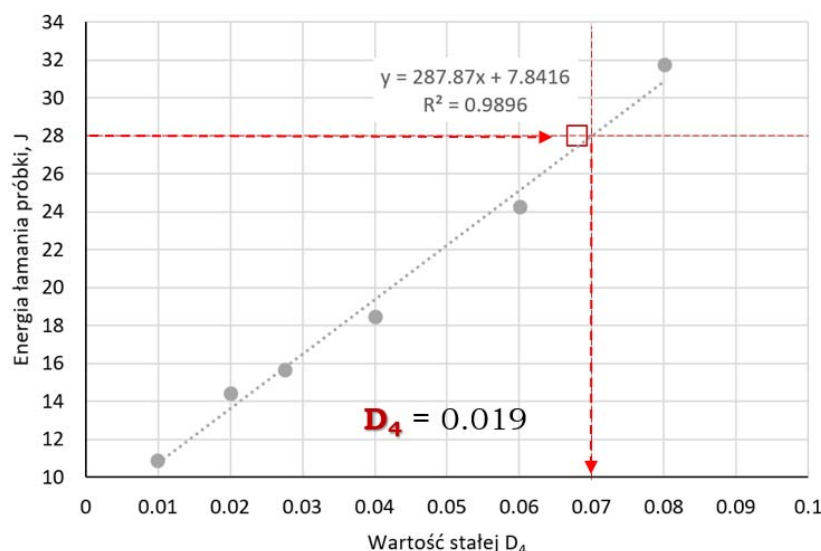
RYS. 8. Geometria próbki

Po wykonaniu eksperymentu należy przeprowadzić symulację numeryczną odwzorowującą ten proces. Symulację należy wykonać dla różnych wartości stałej D_4 , tak aby uzyskać wykres zależności wartości energii kinetycznej od wartości parametru D_4 .

Wyznaczanie parametru D_4 modelu uszkodzenia J-C

Wskazania właściwej wartości stałej wrażliwości na prędkość odkształcenia modelu uszkodzenia Johnsona-Cooka (3) dokonuje się w oparciu o utworzony z zastosowaniem symulacji wykres zależności

o którym była mowa wcześniej. Należy w pierwszym kroku oznaczyć linię na osi rzędnych odpowiadającą średniej wartości energii kinetycznej wyznaczonej na podstawie badań eksperymentalnych następnie odnaleźć punkt przecięcia tej linii z linią aproksymującą punkty będące wynikami symulacji. Znajac punkt przecięcia wspomnianych linii na osi odciętych należy odczytać właściwą dla badanego materiału wartość parametru D_4 (Rys. 9.)



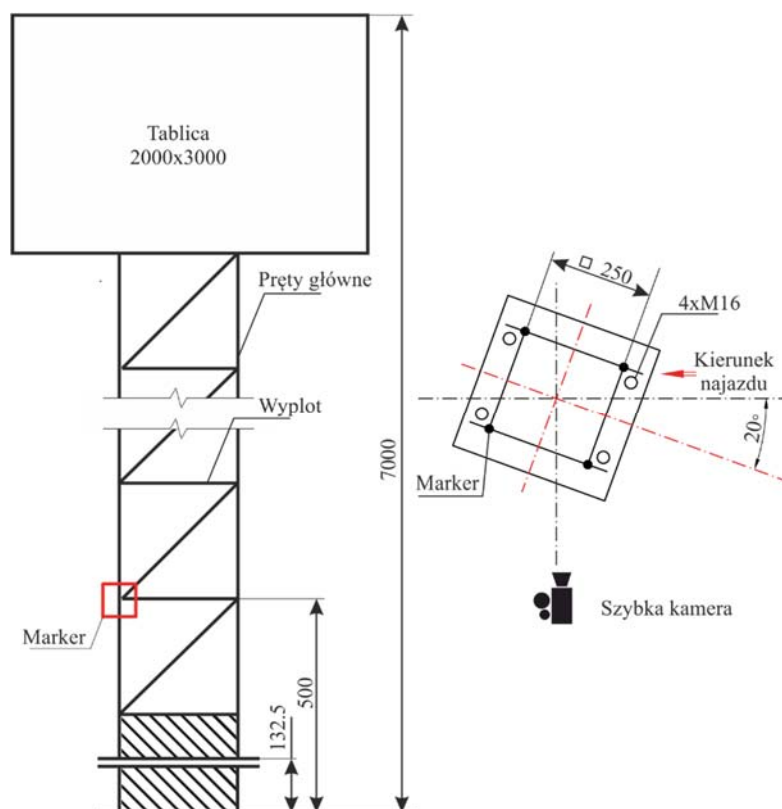
RYS. 9. Zależność energii łamania próbki od wartości stałej D_4

9. Badania aplikacyjne

Badania aplikacyjne polegały na przeprowadzeniu testu zderzeniowego oraz przygotowaniu jego symulacji numerycznej z zastosowaniem modelu materiałowego Johnsona-Cooka, w którym stałe materiałowe przyjęto zgodnie z wyznaczonym za pomocą prezentowanej metodyki. Dodatkowo przeprowadzono symulację numeryczną z zastosowaniem podstawowego modelu materiałowego, który nie uwzględniał wpływu prędkości odkształcenia na zachowanie się materiału.

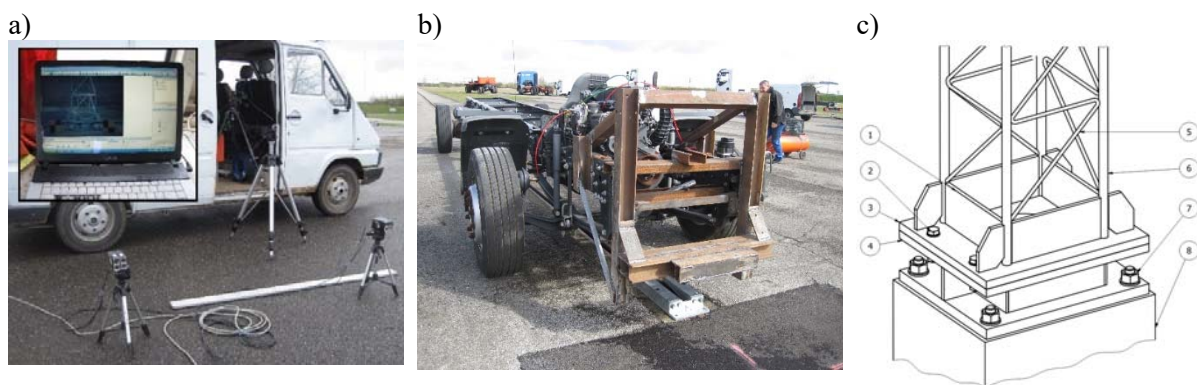
Test zderzeniowy przeprowadzono w ośrodku badawczym Lier w mieście Lyon we Francji. Wytyczne dla testu zderzeniowego opracowano zgodnie z wymaganiami normy PN EN 12 767 dotyczącej biernego bezpieczeństwa infrastruktury drogowej.

Na Rys. 10 można zobaczyć sposób montażu masztu względem kierunku najazdu przez pojazd, umiejscowienie kamery do szybkiej rejestracji obrazu oraz punkty, w których znajdowały się markery przemieszczeń na konstrukcji.



RYS. 10. Miejsce umieszczenia markerów przemieszczeń oraz pozycja masztu względem poruszającego się pojazdu w trakcie eksperymentu

Na rysunku 11 na zdjęciach od lewej widać stanowisko pomiarowe, w którego wkład chodzą fotokomórki do pomiaru prędkości najazdu oraz kamera do szybkiej rejestracji obrazu, na kolejnym zdjęciu specjalnie przygotowaną platformę testową zbudowaną na bazie pojazdu ciężarowego Volvo, na ostatnim zdjęciu widać stopę masztu, w której wykorzystano złącza bezpieczeństwa oznaczone numerem 2.



RYS. 11. a) Stanowisko do rejestracji obrazu, b) Platforma testowa, c) Stopa masztu infrastruktury drogowej

Przeprowadzono łącznie cztery testy zderzeniowe dla dwóch rodzajów konstrukcji, które różniły się między sobą grubością wykorzystanych prętów głównych i wypłotu i dwóch prędkości najazdu 35 i 100 km/h (Tabela 1).

Tabela 1. Plan eksperymentu

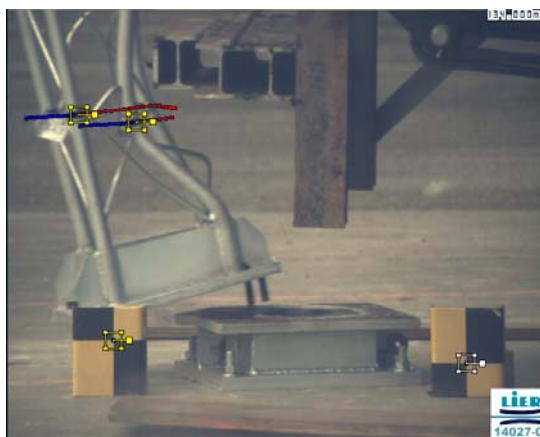
Oznaczenie konstrukcji	Średnica prętów [mm]		Prędkość normatywna pojazdu [km/h]	Prędkość przyjęta do badań [km/h]	Nr testu
	Głównych	Wypłotu			
T_00_32_10	32	10	35	17	1
			100	49	2
T_00_20_8	20	8	35	17	3
			100	49	4

Na początek analizie poddano sposób uszkodzenia się stopy masztu. Jak widać na zdjęciach i w przedstawionej tabeli w zależności od testu uszkodzeniu ulegały albo pręty główne albo łączniki stanowiące złącze bezpieczeństwa (Rys. 12).



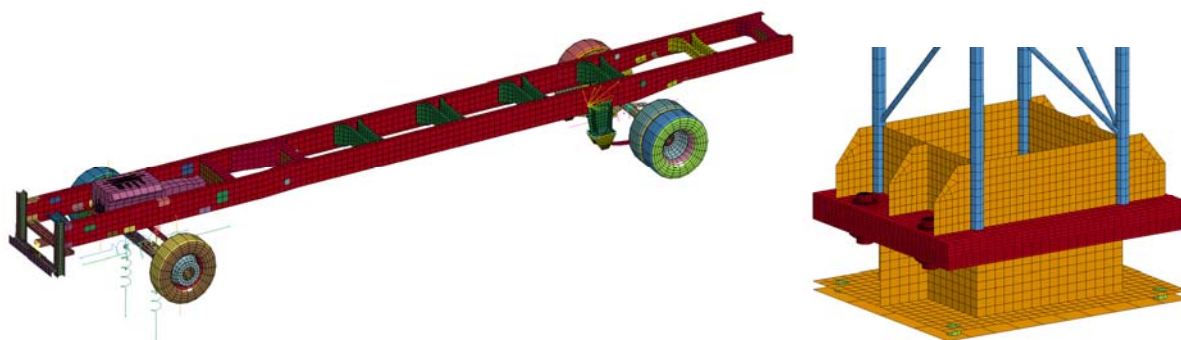
RYS. 12. Stopy masztu po realizacji eksperymentu

Rejestrowano również przemieszczenia markerów umieszczonych na prętach głównych (Rys. 13).



RYS. 13. Śledzenie przemieszczeń markerów na prętach głównych

Przygotowano i wykonano obliczenia numeryczne zrealizowanych testów zderzeniowych środowisku LS Dyna z zastosowaniem dwóch modeli materiałowych. Podstawowego dwuliniowego, Plastic Kinematic, który nie uwzględniał wpływu prędkości odkształcenia oraz modelu Johnsona-Cooka z wartościami stałych zgodnym z wyznaczonymi podczas badań wstępnych i zasadniczych. Model numeryczny przygotowano w środowisku LS-Dyna. Modele platformy testowej oraz stopy masztu zaprezentowano na rysunku 14.



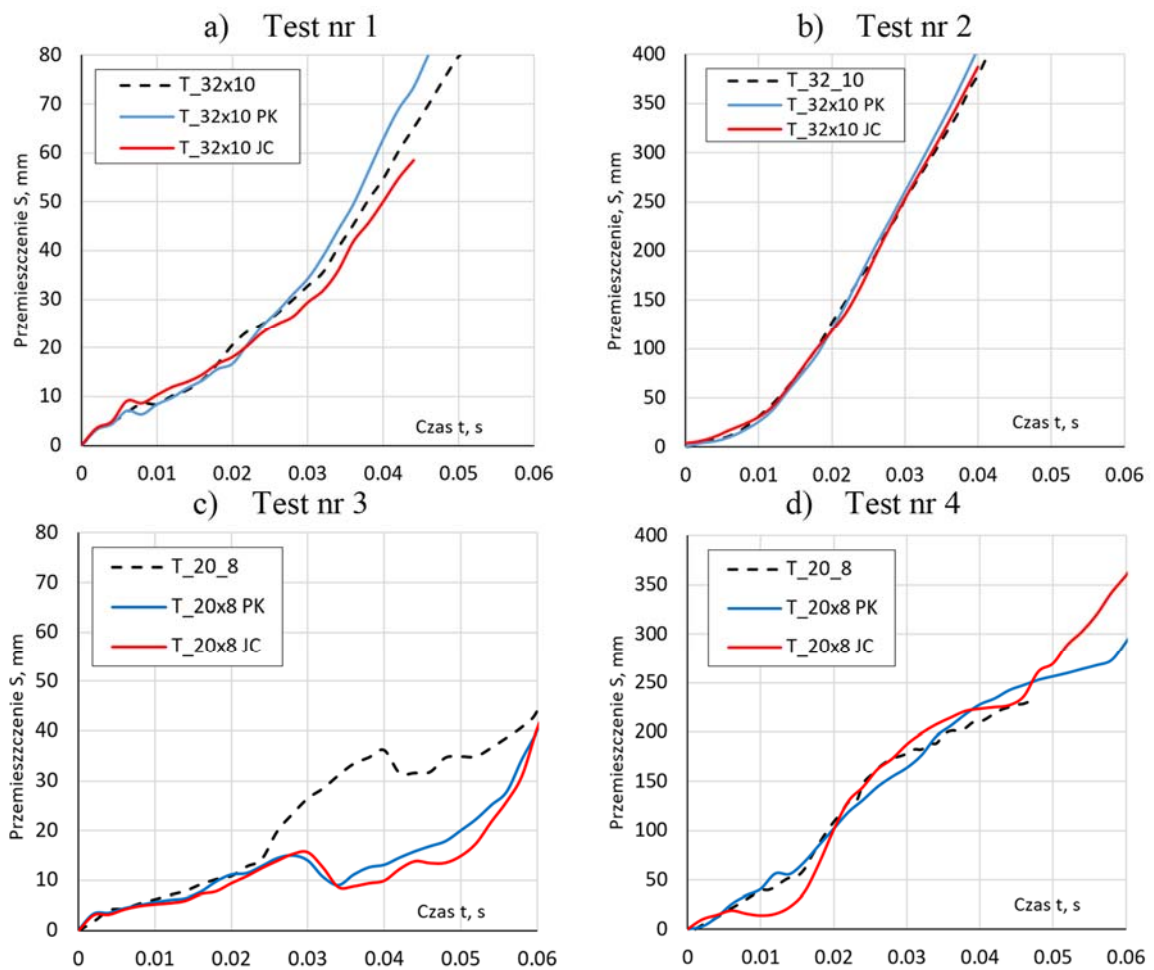
RYS. 14. Model numeryczny platformy testowej i podstawy masztu

W celu porównania wyników eksperymentu do wyników obliczeń numerycznych analizę poddano te same elementy, tj. sposób uszkodzenia się konstrukcji, przemieszczenia markerów oraz dodatkowo czasy przejazdów nad stopą masztu.

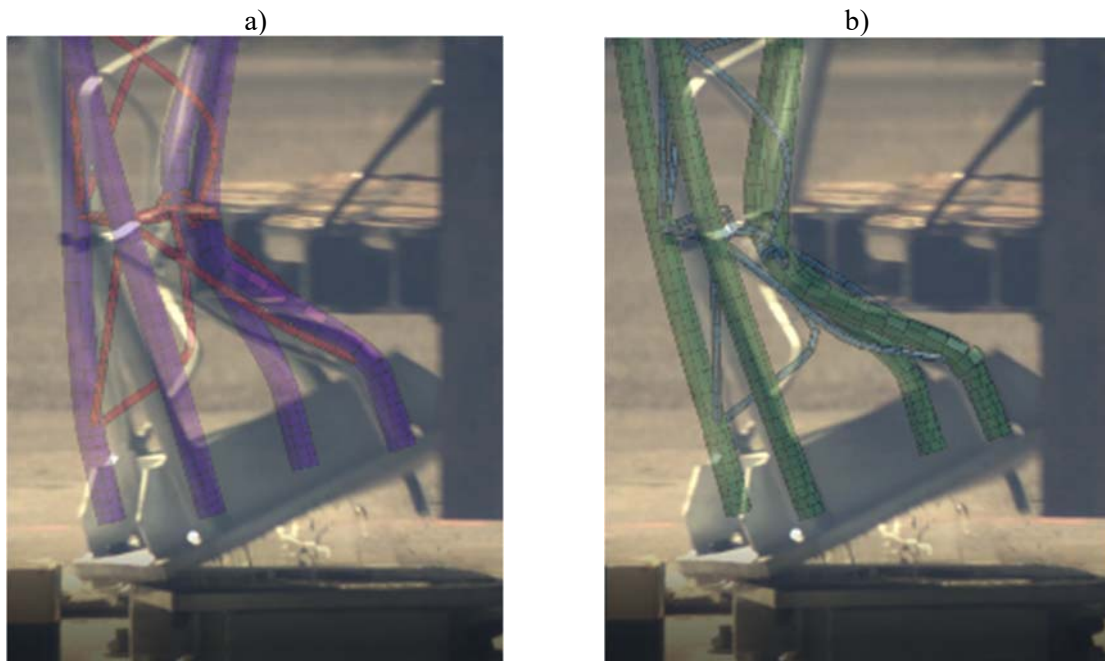
Zgodność wyników w przypadku obu modeli materiałowych w zakresie przemieszczania się markerów, czasów przejazdu czy sposobu uszkodzenia konstrukcji jest wysoka. Analizując obiekt lokalnie nie można zauważyć znaczących różnic w zależności od zastosowanego modelu.

Dodatkowo przeanalizowano kąt rozwarcia pomiędzy płytą podstawy masztu a płytą stopy masztu. Na zdjęcie testu rzeczywistego po prawej stronie naniesiono również odkształconą postać prętów będącą wynikiem symulacji numerycznej z tej samej chwili czasu. Tutaj już znacznie lepiej widoczne są różnice pomiędzy poszczególnymi symulacjami i eksperymentem. Jak można zauważyć symulacja, w której zastosowano model JC znacznie lepiej odwzorowuje rzeczywiste zachowanie się konstrukcji.

Na potrzeby tego autoreferatu na rysunkach 15 - 17 zaprezentowano wybrane wyniki porównania eksperymentu z symulacjami numerycznymi.



RYS. 15. Zestawienie przemieszczeń markerów znajdujących się na prętach głównych

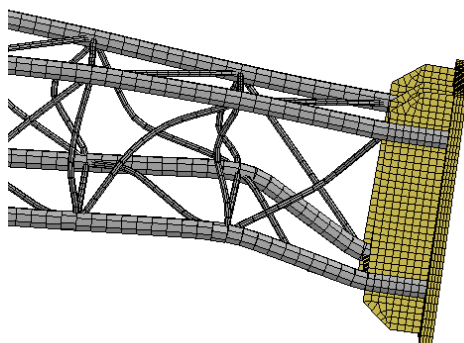


RYS. 16. Odształcenie konstrukcji a) Plastic Kinematic, b) Johnson-Cook

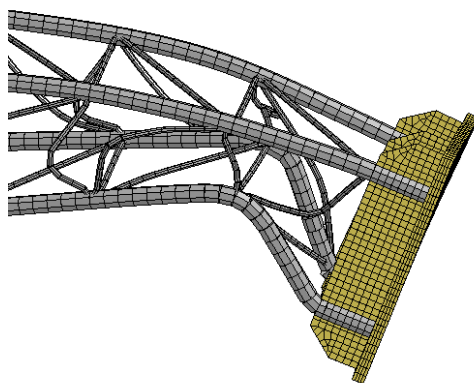
a)



b)



c)



RYS. 17. Odształcenie konstrukcji w wyniku realizacji testu nr 3: a) eksperyment, b) symulacja PK, c) symulacja J-C

10. Wnioski i przesłanki do dalszych badań

Wnioski poznawcze

1. W rozprawie zaproponowano nową metodykę wyznaczania stałych dla modelu umocnienia Johnsona-Cooka w próbie Charpy'ego na próbkach gładkich.
2. W rozprawie zaproponowano nową metodykę wyznaczania stałych dla modelu uszkodzenia Johnsona-Cooka w próbie Charpy'ego na próbkach z karbem.
3. Metody zweryfikowano porównując stałe materiałowe wyznaczone za ich pomocą z wartościami tych stałych wyznaczonymi metodami dotychczas stosowanymi oraz przeprowadzając symulacje MES prób eksperymentalnych.
4. W pracy pozytywnie zweryfikowano sposób modelowania MES z uwzględnieniem modelu J-C na podstawie porównania wyników modelowania z wynikami przeprowadzonych badań aplikacyjnych na torze zderzeniowym.

Wnioski utylitarne

1. Uwzględnienie wpływu prędkości odkształcenia na zachowanie się materiału podczas modelowania eksperymentu przeprowadzonego w ramach badań aplikacyjnych pozwoliło na lepsze odwzorowanie jego rzeczywistego zachowania w ramach symulacji.
2. Zastosowanie modelu materiałowego Johnsona-Cooka nie wpłynęło w przypadku badanej konstrukcji na podjęcie decyzji o wprowadzeniu ewentualnych zmian konstrukcyjnych. Spowodowane było to przeważającym znaczeniem cech geometrycznych nad cechami materiałowymi na wytrzymałość projektowanej konstrukcji.
3. Wyniki przeprowadzonych badań aplikacyjnych wskazują na możliwość ograniczenia liczby badań eksperymentalnych w procesie projektowania do jednego testu zderzeniowego ostatecznej wersji konstrukcji, jeśli w procesie konstrukcyjnym uwzględniono wyniki analiz MES z zastosowaniem modelu materiałowego J-C.

Przesłanki do dalszych badań

1. Planuje się zweryfikowanie, czy z zastosowaniem zaproponowanej metodyki możliwe byłoby wyznaczenie wpływu temperatury na umocnienie oraz uszkodzenie materiału, czyli wyznaczenie stałych m i D_5 modeli Johnsona-Cooka.
2. Planuje się zweryfikowanie możliwości wyznaczania stałych A , B , n w próbie trójpunktowego zginania z wykorzystaniem próbek gładkich o geometrii takiej, jak w przypadku badań na młocie Charpy'ego.
3. Koniecznym jest zweryfikowanie zaproponowanej metodyki dla większej liczby materiałów, charakteryzujących się różną wrażliwością na prędkość odkształcenia.
4. Należy ustalić przydatność zaproponowanej metodyki do wyznaczania stałych materiałowych innych matematycznych modeli umocnienia i uszkodzenia.
5. Istnieje potrzeba zaplanowania eksperymentu na konstrukcji rzeczywistej, w której w odróżnieniu od eksperymentu przeprowadzonego w zakresie badań aplikacyjnych, wpływ cech materiałowych byłby istotniejszy niż wpływ cech geometrycznych.