

Poprawa sztywności belki wzmocnienia tylnych drzwi samochodu osobowego

Improvement of passenger car rear side door beam stiffness

JACEK STADNICKI
IRENEUSZ WRÓBEL*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.84>

Aby chronić pasażerów przed skutkami zderzenia bocznego, w drzwiach samochodów osobowych montuje się wzmocnienia – belki drzwiowe, których sztywność sprawdza się podczas prób stanowiskowych. Opisano model MES do symulowania takiego testu, a po sprawdzeniu wykorzystano go do poprawy sztywności belki wzmocniającej tylne drzwi.

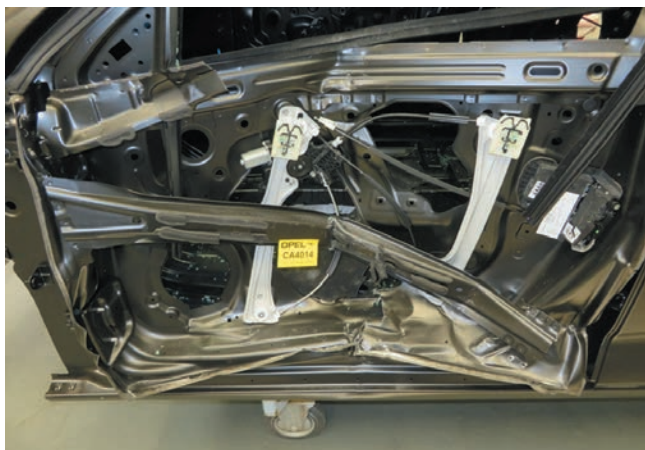
SŁOWA KLUCZOWE: modelowanie MES, nieliniowa analiza deformacji, nadwozie samochodu osobowego, belka drzwiowa

To protect passengers against consequences of side crash side door beams are assembled to doors of passenger cars. Their stiffness is examined during stand tests. The FE model to simulate such a test is described. After verification the model has been applied to improve of rear door side beam stiffness.

KEYWORDS: FE modeling, nonlinear analysis of deformation, passenger car body, side door beam

Aby ochronić pasażerów przed skutkami zderzenia bocznego, w drzwiach samochodów osobowych montuje się wzmocnienia – belki drzwiowe, które pochłaniają część energii zderzenia, odkształcając się plastycznie.

Na rys. 1 pokazano zdjęcie tylnych drzwi samochodu osobowego po teście zderzeniowym, z widocznymi załamaniem belki drzwiowej.

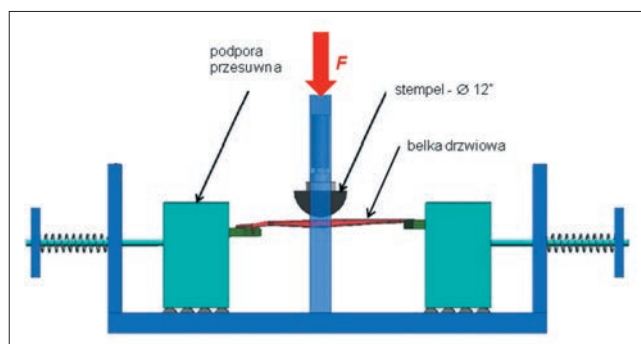


Rys. 1. Belka tylnych drzwi po teście zderzeniowym

Doświadczalny test zderzeniowy całych drzwi jest ostateczną weryfikacją poprawności konstrukcji belki drzwiowej, dlatego na etapie opracowywania jej konstrukcji i technologii wykonania przeprowadza się pomocnicze testy stanowiskowe, których warunki określają producenci samochodów.

Na rys. 2 pokazano schemat stanowiska stosowanego przez firmę General Motors [1]. Podpory przesuwne do mocowania belki drzwiowej są połączone z podstawą

stanowiska za pomocą sprężyn śrubowych o sztywności $k = 250 \text{ N/mm}$, w ten sposób uwzględniona jest podatność ramy drzwi. Zadaje się pionowe przemieszczenie stempla f ze stałą prędkością $v < 12,7 \text{ mm/s}$ ($0,5 \text{ in/s}$) do wartości końcowej $f_k = 152,4 \text{ mm}$ (6 in). Dla przemieszczenia $f_{\text{max}} = 115 \text{ mm}$ siła reakcji belki F powinna być większa od wartości $F(f_{\text{max}}) = 10 \text{ kN}$. Wyznacza się także największą siłę, jaką może przenieść belka (F_{max}) oraz siłę średnią (F_{sr}), obliczaną jako stosunek pola pod krzywą $F(f)$ do f_k .



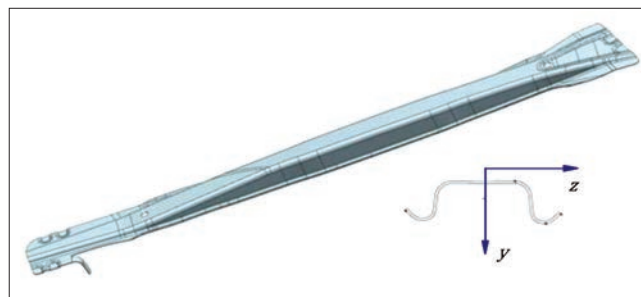
Rys. 2. Schemat stanowiska do badań belki drzwiowej według wymagań [1]

Symulacja testu stanowiskowego belki drzwiowej

Aby przeprowadzić badania stanowiskowe konkretnej belki drzwiowej, należy zaprojektować i wykonać nie tylko samą belkę, lecz także tłocznik potrzebny do jej wytworzenia. Wprowadzenie zmiany konstrukcyjnej w razie niepowodzenia testu pociąga za sobą konieczność przygotowania nowego tłoczniaka, co wymaga czasu i jest kosztowne. Z tych powodów opracowano model obliczeniowy belki drzwiowej i stanowiska do przeprowadzania symulacji komputerowej, odtwarzającej test stanowiskowy.

Objektem analizy była belka drzwiowa tylnych drzwi samochodu osobowego widoczna na rys. 1, której model geometryczny pokazano na rys. 3.

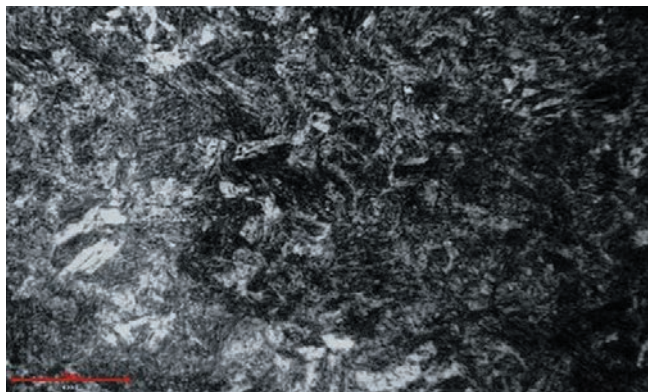
Belka drzwiowa jest wykonana z blachy o grubości $1,4 \text{ mm}$, ze stali borowej 22 MnB5 z warstwą Al-Si (nazwa handlowa: USIBOR1500). Jest formowana z wykorzystaniem technologii *hot forming*, polegającej na tłoczeniu na gorąco i hartowaniu w jednej operacji.



Rys. 3. Model geometryczny analizowanej belki drzwiowej

* Prof. dr hab. inż. Jacek Stadnicki (jstadnicki@ath.bielsko.pl), dr hab. inż. Ireneusz Wróbel prof. ATH (iwrobel@ath.bielsko.pl) – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

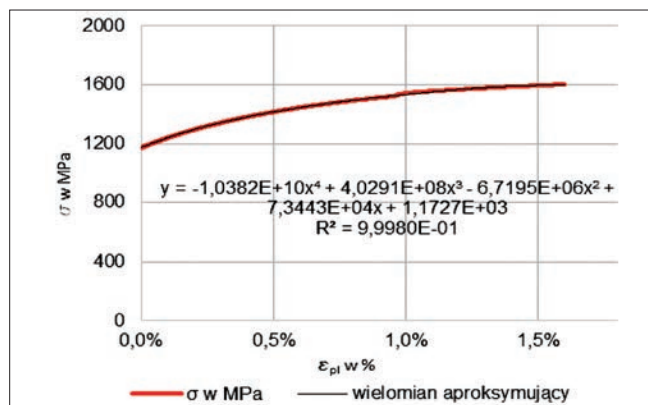
Na rys. 4 pokazano zgląd przekroju poprzecznego belki po formowaniu z widoczną niejednorodną strukturą zawierającą fazę martenzytu z drobnymi wtrąceniami perlitu. Taka struktura wpływa na własności mechaniczne materiału belki, co skutkuje innymi od dostępnych w bibliotekach programów MES wartościami stałych modelu materiałowego. W celu wyznaczenia tych stałych wycięto z uformowanej belki cztery próbki wioselkowe i poddano je próbie jednoosiowego rozciągania zgodnie z wymaganiami normy ISO 6892-1:2009 A224.



Rys. 4. Zgląd przekroju belki drzewianej w 100-krotnym powiększeniu

Z uwagi na izotropowość własności materiałowych opracowano uśrednioną charakterystykę $\sigma(\epsilon)$, a na jej podstawie wyznaczono umowną granicę plastyczności $R_{p0,2} = 1173$ MPa i granicę wytrzymałości $R_m = 1615$ MPa. Do opisu nieliniowego zachowania materiału w zakresie odkształceń plastycznych aproksymowano tę część charakterystyki $\sigma(\epsilon_{pl})$ wielomianem czwartego stopnia.

Na rys. 5 pokazano obie krzywe oraz równanie wielomianu i współczynnik ich korelacji wzajemnej R^2 .

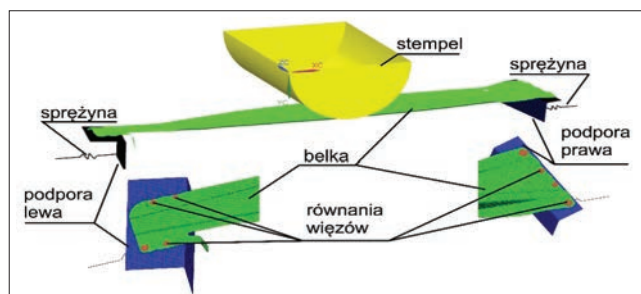


Rys. 5. Uśredniona charakterystyka odkształcenia plastycznego i wielomian aproksymujący

Ponieważ korelacja wielomianu aproksymującego z uśrednioną charakterystyką $\sigma(\epsilon_{pl})$ jest bardzo dobra, prawo umocnienia w modelu materiałowym zdefiniowano za pomocą 10 punktów wyznaczonych z wielomianu.

Symulację testu stanowiskowego zginania belki drzewianej przeprowadzono w środowisku LS Dyna. Schemat modelu MES pokazano na rys. 6.

W modelu MES wykorzystano czterowęzłowe elementy powierzchniowe typu *Shell*, które dla belki były podatne, a dla stempła i podpór przesuwnych – sztywne. Podpory przesuwne były połączone z ostoją elementami sprężystymi o sztywności i naciągu wstępnym zgodnym z warunkami testu [1]. Połączenie śrubowe belki z podporami

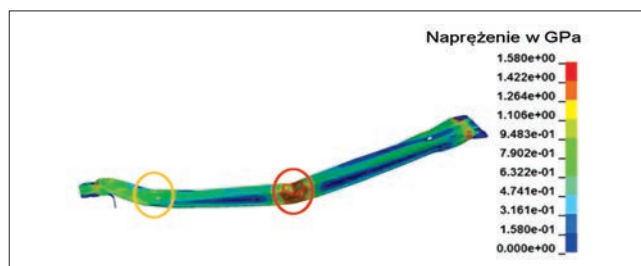


Rys. 6. Schemat modelu MES stanowiska

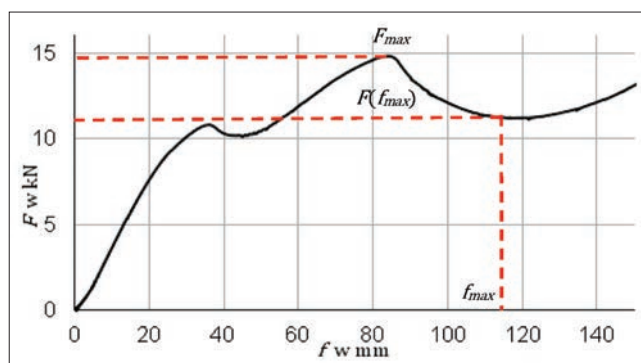
zamodelowano z pomocą równań więzów, a działanie stempła na belkę odwzorowano elementami kontaktowymi z tarcie typu powierzchnia–powierzchnia. Podczas symulacji zadawano narastające liniowo przemieszczenie pionowe stempła z prędkością 2 mm/s do wartości 152,4 mm (6") [1].

Łącznie model MES stanowiska tworzyło 45001 elementów skończonych połączonych w 45842 węzłach, w tym badaną belkę – 36881 elementów połączonych w 37455 węzłach.

Na rys. 7 pokazano deformację belki oraz naprężenie zredukowane w belce po symulacji testu stanowiskowego. Na rys. 8 zilustrowano przebieg siły nacisku stempła w funkcji ugięcia belki pod stempłem podczas testu.



Rys. 7. Deformacja i naprężenie zredukowane w belce drzewianej po symulacji testu stanowiskowego



Rys. 8. Przebieg siły nacisku stempła w funkcji ugięcia belki pod stempłem podczas symulacji testu stanowiskowego

Porównanie wyników symulacji testu stanowiskowego (rys. 7) z obrazem deformacji drzwi po teście zderzenia bocznego (rys. 1) dowodzi, że:

- warunki testu stanowiskowego dobrze odwzorowują test zderzenia bocznego,
- założenia modelu MES do symulacji testu stanowiskowego zostały przyjęte prawidłowo.

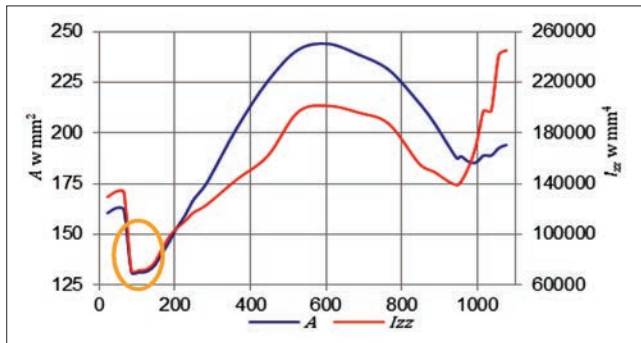
Z wykresu na rys. 8 można odczytać, że sztywność analizowanej belki jest wystarczającą, ponieważ dla ugięcia $f_{max} = 115$ mm siła $F(f_{max}) = 11,26$ kN, aczkolwiek maksymalna siła, jaką można obciążyć belkę, wynosi $F_{max} = 14,86$ kN, a średnia siła podczas testu $F_{sr} = 11,54$ kN.

Poprawa sztywności belki drzwiowej

Na rys. 7 można zauważyć, że podczas zginania belki drzwiowej tworzą się dwa przeguby plastyczne – pierwszy znajduje się w odległości ok. 100 mm od lewego końca, a drugi – w połowie długości belki.

Obserwacja symulacji wykazała, że załamanie belki następuje najpierw w pobliżu pierwszego, a potem w pobliżu drugiego przegubu plastycznego. Aby to wyjaśnić, sprawdzono zmiany parametrów przekrojowych na długości belki z pomocą narzędzi programu CATIA.

Na rys. 9 pokazano zmiany przekroju A i głównego momentu bezwładności przekroju I_{zz} (rys. 3).



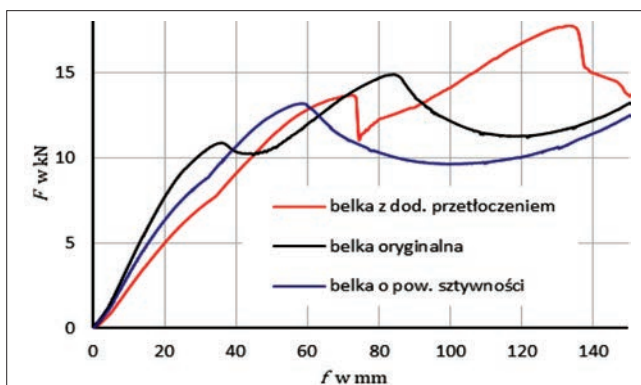
Rys. 9. Zmiana przekroju A i momentu bezwładności przekroju I_{zz} na długości belki

Na wykresie (rys. 9) można znaleźć potwierdzenie, że w miejscu odległym o ok. 100 mm od lewego końca belki, dodatkowo osłabionym otworem, występuje skokowy spadek sztywności belki. Jest on powodem tworzenia się przegubu plastycznego, który zapoczątkowuje załamanie belki w tym miejscu, a następnie w połowie jej długości.

Słuszny wydawał się wniosek, że aby usztywnić całą belkę, należy zmienić jej kształt i zniwelować skokową zmianę sztywności w tym miejscu. Ponieważ usunięcie otworu osłabiającego belkę nie było możliwe, zmieniono kształt belki w tym miejscu, wykorzystując dostępną przestrzeń wyznaczoną przez warunki zabudowy belki w drzwiach. Dla belki o powiększonej sztywności zginania przeprowadzono ponownie symulację testu stanowiskowego.

Porównanie przebiegu siły nacisku stempla F w funkcji ugięcia belki pod stemplem f dla oryginalnej belki i belki o powiększonej sztywności pokazano na rys. 10.

Analiza rys. 10 oraz przebiegu deformacji podczas symulacji testu stanowiskowego wskazują, że uzyskano efekt odwrotny do zamierzonego. Belka nie spełnia wymagań testu, ponieważ dla ugięcia $f_{\max} = 115$ mm, siła

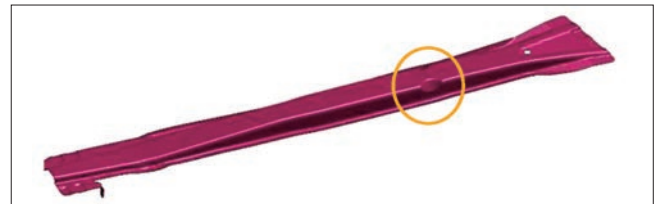


Rys. 10. Porównanie przebiegów siły nacisku stempla w funkcji ugięcia pod stemplem podczas testu stanowiskowego dla belki oryginalnej, belki o zwiększonej sztywności i belki z dodatkowym przetłoczeniem

$F(f_{\max}) < 10$ kN. Zmniejszyła się również maksymalna siła, jaką można obciążyć belkę do $F_{\max} = 13,27$ kN oraz średnia siła podczas testu do $F_{sr} = 11,07$ kN.

Dlatego po raz kolejny zmieniono kształt belki poprzez wprowadzenie dodatkowego przetłoczenia w prawej części belki (rozwiązanie jest przedmiotem zgłoszenia patentowego), które ma zainicjować dodatkowy przegub plastyczny w miejscu, w którym belka była niewytężona.

Po przeprowadzeniu wielu symulacji testu ustalono najlepszy kształt i położenie tego przetłoczenia, które pokazano na rys. 11. Porównanie odpowiadającego mu przebiegu siły nacisku stempla $F(f)$ z poprzednimi konstrukcjami belki przedstawiono na rys. 10.



Rys. 11. Model geometryczny belki drzwiowej o powiększonej sztywności, z dodatkowym przetłoczeniem

W tabelicy zestawiono wartości wielkości charakterystycznych dla analizowanych belek drzwiowych, które wyznaczono na podstawie symulacji testu stanowiskowego.

TABLICA. Porównanie wartości liczbowych wielkości charakterystycznych dla analizowanych belek drzwiowych

Wielkość	Jednostka	Belka oryginalna	Belka o powiększonej sztywności	Belka z dodatkowym przetłoczeniem
F_{\max}	kN	14,91	13,27	17,93
$F(f_{\max})$	kN	11,35	9,82	16,22
F_{sr}	kN	11,54	11,07	12,34

Podsumowanie

Symulacje testu zginania belki drzwiowej wykazały, że:

- zaproponowany model MES stanowiska dobrze odzorowywał przebieg rzeczywistego testu stanowiskowego;
- ponieważ przebieg procesu formowania na gorąco wpływa na strukturę materiału, model materiałowy powinien być wyznaczony dla konkretnego procesu,
- przeprowadzanie analiz porównawczych różnych konstrukcji belki na etapie projektowania pozwoliło znaleźć najlepszą postać belki z uwagi na jej sztywność i zdolność do pochłaniania energii zderzenia,
- oryginalna konstrukcja belki z dodatkowym lokalnym osłabieniem sztywności w miejscu określonym przez konstruktora, którego skutkiem jest dodatkowy lokalny przegub plastyczny, przyniosła: poprawę sztywność belki (największa siła, jaką może przenieść belka podczas testu, F_{\max} wzrosła z 14,91 kN do 17,93 kN, tj. o 20%), lepszą ochronę pasażerów przed urazem na skutek zderzenia (siła przy największej dopuszczalnej przez wymagania testu deformacji $F(f_{\max})$ wzrosła z 11,35 kN do 16,22 kN, tj. o 43%), powiększenie zdolności pochłaniania energii zderzenia (średnia siła podczas testu F_{sr} zwiększyła się z 11,54 kN do 12,34 kN, tj. o 7%).

LITERATURA

1. <http://standards.globalspec.com/std/10053611/gmw16418GMW16418> Door Beam Bending Strength Test, Worldwide Engineering Standards.