# Numeryczna symulacja testu zderzeniowego z uwzględnieniem umocnienia odkształceniowego w procesie wytwarzania energochłonnego elementu samochodu

## Numerical simulation of crash test accounting for the strain hardening in the manufacturing process of energy-absorbing part in the car body

**MATEUSZ AMBROZIŃSKI ROMAN KUZIAK**
**SŁAWOMIR POLAK WŁADYSŁAW CHORZĘPA**
**ZBIGNIEW GRONOSTAJSKI MACIEJ PIETRZYK***

**Przedmiotem artykułu jest ocena możliwości numerycznej symulacji zachowania się elementów nadwozia samochodu w czasie kolizji. Opisano problematykę związaną z wytwarzaniem elementów pochłaniających energię oraz doborem materiału na te elementy. Do analizy wybrano stal z mikrododatkami, stal dwufazową i stal z efektem umocnienia (TRIP). Przeprowadzono symulacje wytwarzania oraz eksploatacji, tj. test zderzeniowy (*crash test*), elementu karoserii samochodowej wykonanego z tych stali. W teście zderzeniowym przyjęto dwa modele materiału. W pierwszym pominięto odkształcenia materiału podczas wytwarzania elementu, natomiast w drugim uwzględniono lokalną niejednorodność odkształceń powstałych w trakcie tłoczenia. Wyniki obliczeń porównano z fizycznymi symulacjami testu zderzeniowego. Wykazano, że drugie podejście daje znacznie lepsze oszacowanie właściwości produktu dla stali z mikrododatkami i stali dwufazowej. Takiej poprawy dokładności nie uzyskano dla stali z efektem TRIP.**
**SŁOWA KLUCZOWE: zaawansowane stale o podwyższonej wytrzymałości, karoseria samochodu, umocnienie odkształceniowe, test zderzeniowy**

*Paper deals with an evaluation of possibilities of numerical simulations of car body parts during collision. Problem of manufacturing of the crash box and selection of materials for this part was described. Microalloyed steel, Dual Phase (DP) steel and TRIP (Transformation Induced Plasticity) steel were selected for the analysis. Numerical simulations of manufacturing of crash box and crash tests were performed for element made of the three selected steels. Two variants of material model were used in the simulations of the crash test. In the first variant earlier deformation of the material during manufacturing was neglected. In the second variant strains calculated in simulations of the stamping process were transferred to the crash box. Results of calculations were compared with physical simulations of the crash test. It was shown that the second variant gives improvement of the results for microalloyed and DP steels. This improvement was not observed for the TRIP steel.*
*KEYWORDS: AHSS, automotive parts, strain hardening, crash test*

Zaawansowane stale o wysokiej wytrzymałości, oznaczane jako AHSS (*Advanced High Strength Steels*), znajdują coraz powszechniejsze zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym – przede wszystkim w produkcji elementów wzmacniających nadwozia samochodów i poprawiających bezpieczeństwo pasażerów. Przedmiotem analizy przedstawionej w niniejszym artykule jest właśnie element odpowiedzialny za pochłanianie energii podczas kolizji samochodowych [1] (*crash box*).

Podstawowym kryterium oceny tego typu elementów jest zdolność do pochłaniania energii odkształcenia. W laboratoriach naukowych i ośrodkach badawczych przemysłu samochodowego prowadzi się intensywne badania, które z jednej strony obejmują poszukiwania materiałów charakteryzujących się wysoką wytrzymałością i odkształcalnością [2÷4], a z drugiej – optymalizowanie kształtów elementów odpowiedzialnych za pochłanianie energii podczas kolizji [5]. Te badania muszą być wspomagane numerycznym modelowaniem zarówno procesu wytwarzania wspomnianych elementów, jak i ich zachowania się podczas kolizji.

W ramach projektu NCBiR NR07-0053-10 pt. „Technologiczne aspekty zastosowania nowej generacji stali (AHSS) na elementy nadwozi samochodowych" autorzy opracowali modele symulujące cykl produkcji [6, 7] oraz *crash test* słupka zderzeniowego. Dokładność symulacji zależy w dużej mierze od poprawności opisu własności materiału. Jedną z przyczyn niedokładności jest nieuwzględnienie historii procesu, dlatego w pracy wykonano symulacje testu zderzeniowego dla dwóch wariantów umocnienia materiału. W pierwszym przypadku nie uwzględniono wartości odkształceń wprowadzonych do materiału podczas wytwarzania elementu, a w drugim – wzięto pod uwagę lokalną nierównomierność odkształceń powstałych podczas tłoczenia. Wyniki porównano z fizycznymi symulacjami testów zderzeniowych dla elementu wytworzonego w firmie Kirchhoff Polska.

### Element pochłaniający energię podczas kolizji

W przemyśle motoryzacyjnym ciągle prowadzone są badania nad doborem optymalnych materiałów na poszczególne części karoserii. Kluczowe jest pytanie: w jakim stopniu elementy wytwarzane z różnych gatunków stali spełnią rosnące oczekiwania użytkowników i wymagania dotyczące ochrony środowiska.

Jak wiadomo, zmniejszenie masy karoserii pociąga za sobą mniejsze zużycie paliwa i mniejsze wydzielanie dwutlenku węgla, co ma pozytywny wpływ na środowisko naturalne. Aby jednak zmniejszyć masę samochodu, trzeba modyfikować pojedyncze elementy – przez zmianę ich kształtu i dobór najlepszych materiałów. Oczywiście te działania muszą spełniać warunek utrzymania kosztów produkcji na rozsądnym poziomie.

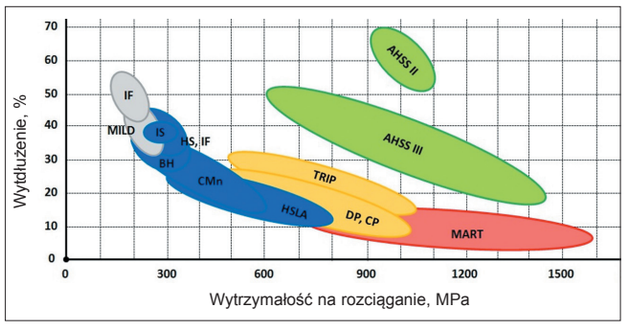
Elementy odpowiedzialne za pochłanianie energii powinny się charakteryzować wysoką wytrzymałością z zachowaniem dobrej odkształcalności. Te warunki spełniają elementy stalowe – zastosowanie różnych gatunków stali w przemyśle motoryzacyjnym wciąż wynosi ok. 60% na jednostkę

* Mgr inż. Mateusz Ambroziński (mambroz@agh.edu.pl), prof. dr hab. inż. Maciej Pietrzyk (maciej.pietrzyk@agh.edu.pl) – Akademia Górniczo-Hutnicza; dr inż. Sławomir Polak (slawomir.polak@pwr.wroc.pl), prof. dr hab. inż. Zbigniew Gronostajski (zbigniew.gronostajski@pwr.wroc.pl) – Politechnika Wrocławska; prof. dr hab. inż. Roman Kuziak (rkuziak@imz.pl) – Instytut Metalurgii Żelaza; inż. Władysław Chorzępa (w.chorzepa@kirchhoff.pl) – Kirchhoff Polska Sp. z o.o.

gotowego wyrobu. Oprócz stali konwencjonalnych w produkcji komponentów karoserii samochodów wykorzystuje się zaawansowane stale o bardzo wysokiej wytrzymałości – AHSS [2], do których zaliczamy:

- stale dwufazowe DP (*Dual Phase*),
- stale charakteryzujące się efektem TRIP (*Transformation Induced Plasticity*), tj. efektem umocnienia,
- stale martenzytyczne.

Na rys. 1 zamieszczono wykres, który charakteryzuje poszczególne stale pod względem wytrzymałości na rozciąganie i odkształcalności reprezentowanej przez wydłużenie w próbie rozciągania. W porównaniu ze stalami mikrostopowymi HSLA (*High Strength Low Alloyed*) stale typu AHSS wykazują znaczny wzrost własności wytrzymałościowych z utrzymaniem dobrych własności plastycznych [8].




Rys. 1. Stale stosowane w przemyśle motoryzacyjnym

Na wykresie pokazano dwie grupy stali AHSS: II i III, nazywane odpowiednio stalami drugiej i trzeciej generacji. Stale AHSS II [9] cechuje duża zawartość dodatków stopowych (15÷40%), a ich kształtowanie jest kosztowne. Znacznie lepsze własności w porównaniu ze stalami DP i TRIP mają stale AHSS III [4], w których sumaryczna ilość dodatków stopowych stanowi poniżej 10% – dzięki temu możliwe jest obniżenie kosztów. Bardzo dobre właściwości stali AHSS III uzyskuje przez odpowiednie przeprowadzenie procesu technologicznego wytwarzania blach.

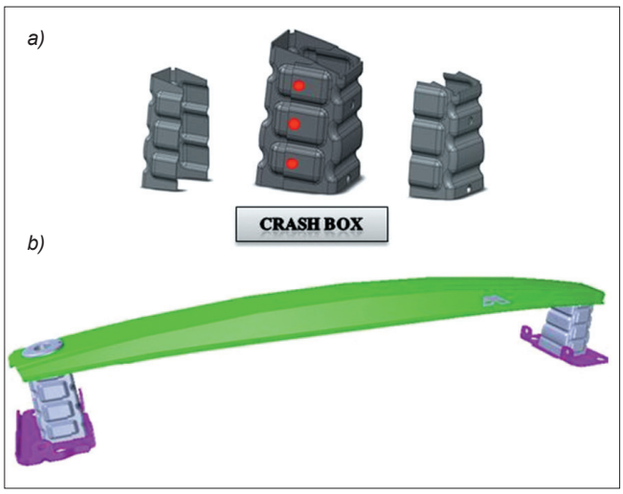
W niniejszym artykule rozważono trzy warianty wykonania elementu pochłaniającego energię uderzenia:

- ze stali DP600,
- ze stali TRIP,
- z mikrostopowej stali HC380LA (jako materiału odniesienia).

HC380LA to konwencjonalna stal mikrostopowa należąca do grupy HSLA, z której dotychczas wykonywano badany element. Następnie do wytworzenia słupka zderzeniowego użyto stali dwufazowej DP600, która ma strukturę kompozytu. Twarde wyspy martenzytu (ok. 15÷30% objętości) znajdują się w osnowie miękkiego ferrytu, co pozwala uzyskać jednocześnie dużą wytrzymałość i dobrą odkształcalność na zimno. Trzecim badanym materiałem była stal TRIP składająca się z faz ferrytycznej, bainitycznej i martenzytycznej oraz z austenitu szczątkowego. Właściwości stali TRIP wykorzystuje się podczas dynamicznych odkształceń – austenit szczątkowy przemienia się wówczas w martenzyt i pochłania energię, a jednocześnie umacnia materiał. Na rys. 2 pokazano typowe mikrostruktury stali HC380LA, DP600 i TRIP.

Z opisanych materiałów wytworzono element umieszczony pomiędzy belką zderzaka a podłużnicami w przedniej oraz tylnej części samochodu. Poprzez swoją kontrolowaną deformację element ten odpowiada za pochłanianie energii podczas zderzeń czołowych i częściowo czołowych. Słupki zderzeniowe mają różne kształty, różne są też sposoby ich łączenia [10]. Dodatkowo elementy te mogą być wypełniane rozmaitymi piankami ze stopów lekkich.

Rys. 2. Mikrostruktura stali: *a*) HC380LA, *b*) DP600, *c*) TRIP




Rys. 3. Numeryczny model słupka zderzeniowego (*a*) oraz złożenie elementu energochłonnego (*b*)

W omawianym przypadku wybrano kształt przedstawiony na rys. 3*a* – element złożony z dwóch niesymetrycznych części łączonych przez zgrzewanie punktowe. Na rys. 3*b* pokazano złożenie przedniej belki wraz ze słupkami zderzeniowymi.

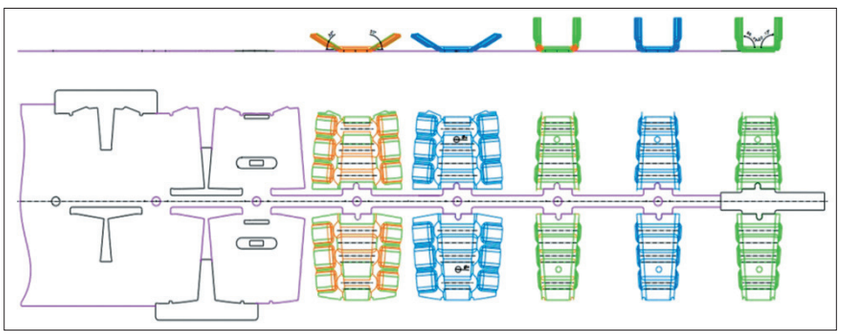
W dalszej części pracy przeprowadzono analizę wpływu zastosowania omawianych trzech rodzajów stali na wytworzenie elementu energochłonnego. Rezultaty symulacji numerycznych porównano z wynikami otrzymanymi dla modelu fizycznego.

## Kształtowanie części słupka zderzeniowego

Część słupka zderzeniowego jest wytwarzana w procesie tłoczenia na zimno. W przypadku zastosowania omówionych wcześniej trzech rodzajów stali uzyskuje się dobrą jakość i wytłoczki są wolne od takich wad, jak: pęknięcia powierzchniowe, sfałdowania lub nieciągłości w objętości obrabianego materiału. W firmie Kirchhoff Polska proces kształtowania elementu składa się z kilku etapów (rys. 4) obejmujących:

- przygotowanie wykrojki (operacje wykrawania i znakowania),
- tłoczenie i doginanie ramion elementu,
- końcowe gięcie ramion i kalibrację.

W wyniku tych operacji powstają gotowe części, które następnie są ze sobą łączone.

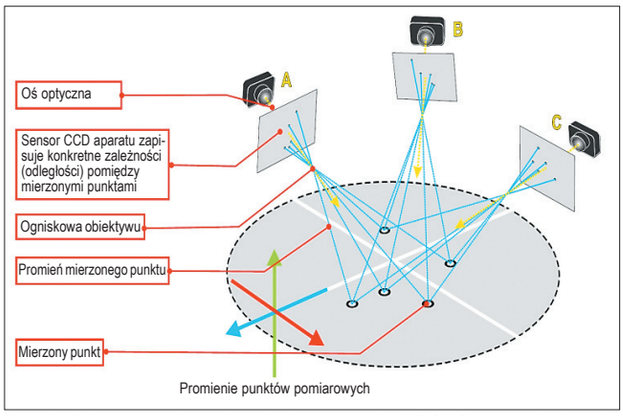


Rys. 4. Kolejne etapy kształtowania elementu w warunkach przemysłowych

Do wyznaczenia odkształceń głównych na powierzchni blachy po etapie tłoczenia wykorzystano bezkontaktowo-optyczny system ARGUS do pomiaru deformacji 3D. Na podstawie punktów pomiarowych obliczane są lokalne odkształcenia blachy. Uzyskuje się zarówno współrzędne 3D z badanej powierzchni, jak i rozkład odkształceń głównych, rozkład intensywności odkształceń oraz wielkość zmiany grubości materiału. System ARGUS wykorzystuje metody fotogrametryczne. W celu zorientowania przestrzennego mierzonego obiektu używane są kodowane punkty, umieszczane bezpośrednio na analizowanym obiekcie. Idea pomiaru polega na tym, aby punkty kodowane i niekodowane zobaczyć z różnych kierunków, oraz na obliczeniu współrzędnych punktów w przestrzeni 3D. Określenie miejsca wykonania zdjęć jest możliwe na podstawie sposobu rozmieszczenia punktów w danym ujęciu. Poszczególne ujęcia powinny dać możliwie największy kąt pomiędzy miejscami wykonania zdjęć (rys. 5).

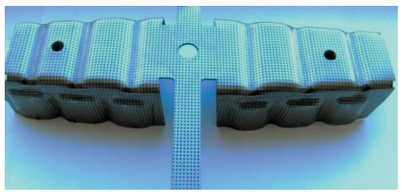
Na otrzymanych elementach naniesiono – metodą elektrochemiczną – siatkę o średnicy punktów 1 mm i odległości pomiędzy punktami 2 mm (rys. 6).

Zmierzone odkształcenia po procesie tłoczenia słupka zderzeniowego porównano z wartościami otrzymanymi z numerycznych symulacji. Na rys. 7 pokazano odkształcenia dla badanych stali uzyskane z pomiarów i z obliczeń. Porównano rozkłady odkształceń głównych na powierzchni zewnętrznej wytłoczki. Obliczone odkształcenia są jakościowo zgodne z pomierzonymi. Ilościowa analiza wyników wskazuje na

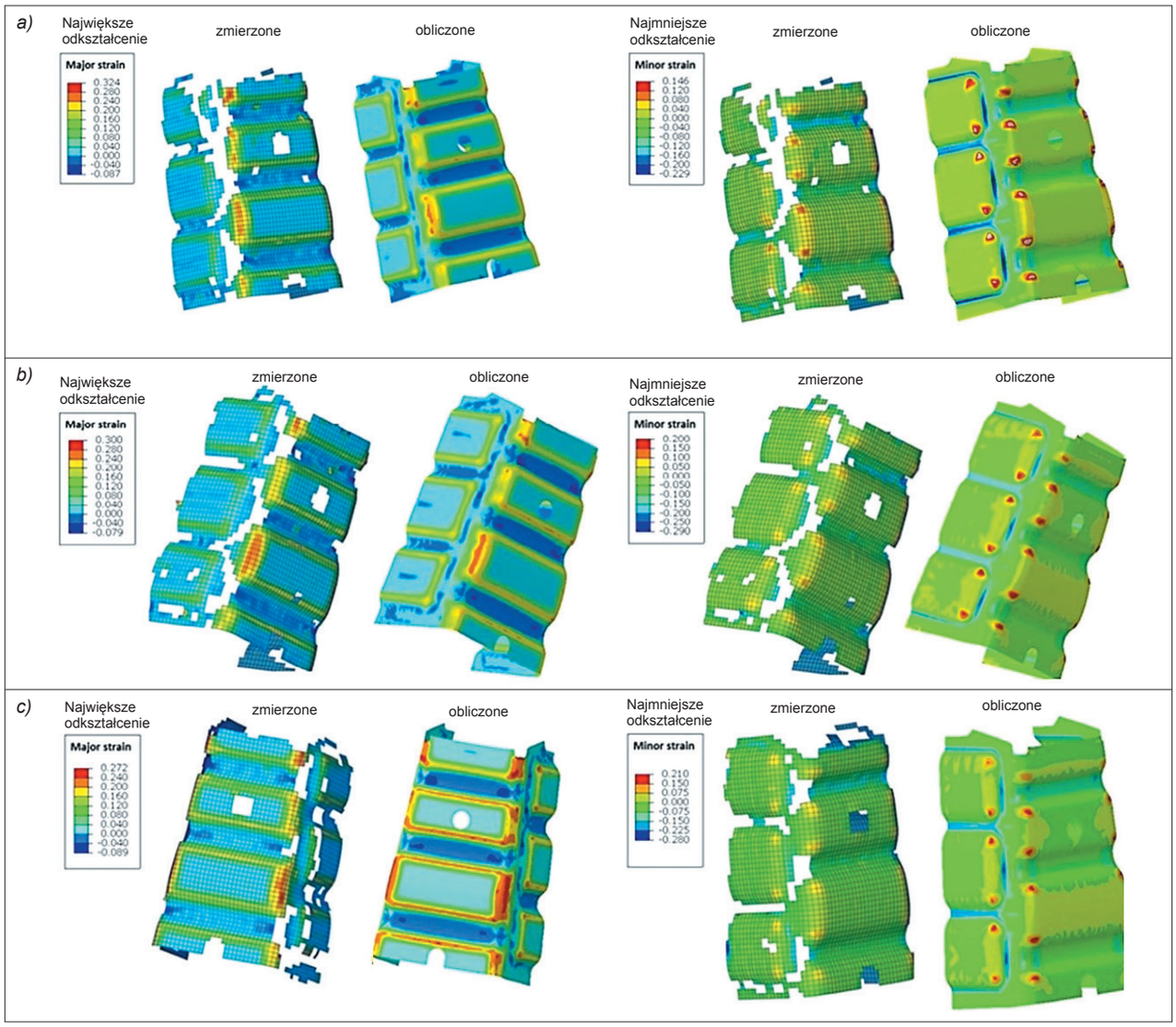



Rys. 5. Schemat wykonania zdjęć w systemie ARGUS – promienie mierzonych punktów

Rys. 6. Kształt badanych wytłoczek z charakterystycznymi punktami



Rys. 7. Wyniki pomiarów odkształceń głównych oraz wyniki symulacji dla stali: *a*) HC380LA, *b*) DP600, *c*) TRIP

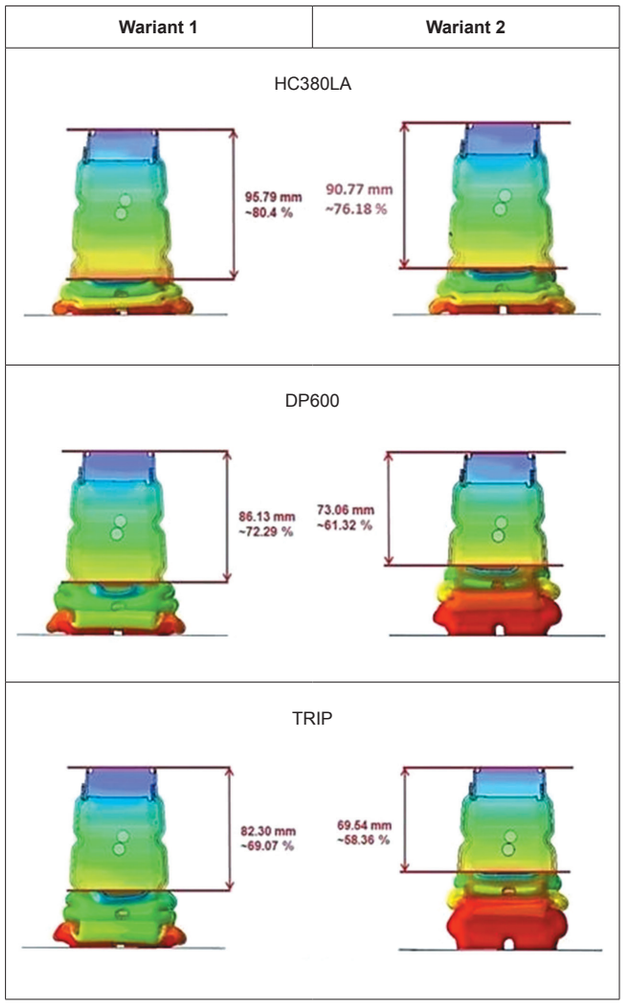


nieco wyższe wartości obliczonych odkształceń w miejscach o największej intensywności, co jest spowodowane zastosowaniem w obliczeniach numerycznych znacznie gęstszej siatki elementów skończonych niż w doświadczeniu. Na rysunku widać również puste miejsca tam, gdzie wystąpiło zatarcie naniesionej siatki wskutek pogrubienia materiału.

### Wyniki symulacji *crash test*

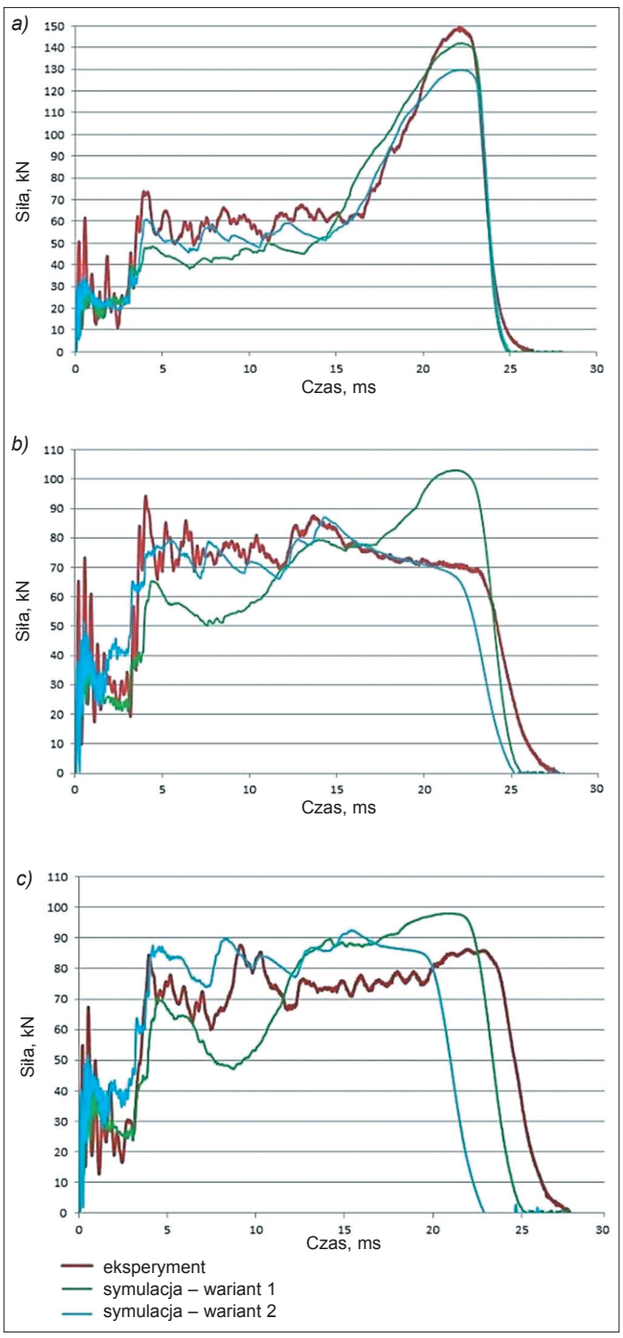
Test eksploatacji polegał na zniszczeniu elementu poprzez kontrolowane odkształcenie, w czasie którego pochłaniana jest energia kinetyczna. Eksperyment fizyczny przeprowadzono z użyciem młota spadowego z bijakiem o masie 227 kg, opuszczanym z wysokości 2,05 m, co wywołało energię uderzenia ok. 4,6 kJ. Warunki próby odwzorowano w numerycznej symulacji. W obliczeniach wprowadzono własności materiału uzyskane z prób rozciągania dla badanych stali. Symulacje przeprowadzono w dwóch wariantach. W pierwszym nie uwzględniono wartości odkształceń zadanych w procesie kształtowania elementu. W drugim wariancie wykonano symulacje cyklu kształtowania (rys. 4) i przeniesiono obliczony rozkład odkształceń do modelu numerycznego *crash test*.

W wyniku przeprowadzanych obliczeń otrzymano różne wartości skrócenia dla dwóch wariantów i tego samego materiału. Skrócenie w wariancie nieuwzględniającym procesu tłoczenia elementu było większe przy pochłonięciu takiej samej ilości energii. Na rys. 8 pokazano przemieszczenia próbek wraz z zaznaczonym procentem skrócenia.

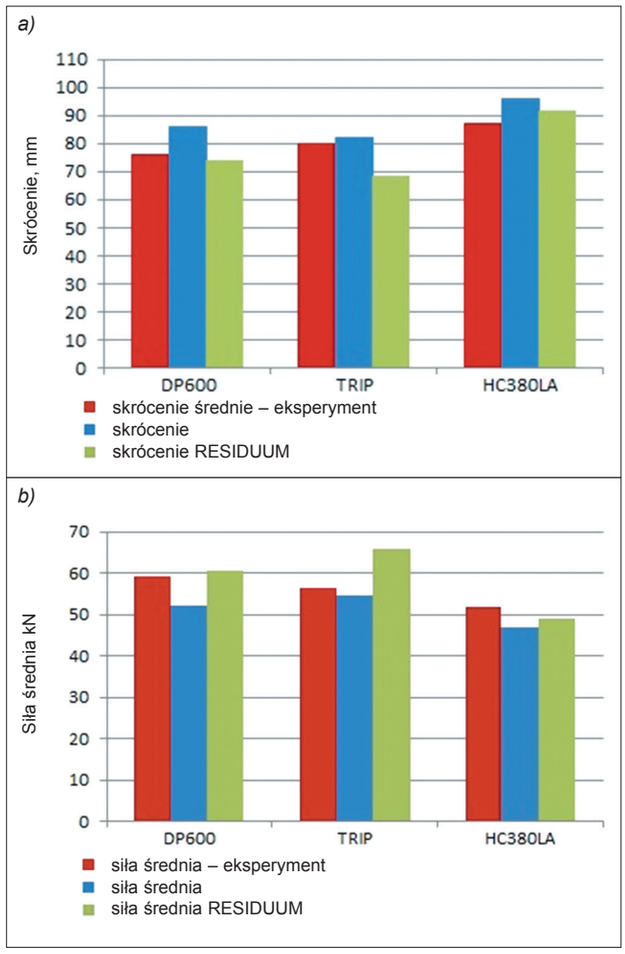



Rys. 8. Przemieszczenia obliczone w symulacji uderzenia elementu energochłonnego

W doświadczeniach rejestrowano siłę reakcji z dolnej płaszczyzny elementu słupka zderzeniowego. W numerycznej symulacji obliczano tę siłę reakcji w funkcji czasu. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 9. Kolorami rozróżniono próbki z doświadczenia i numerycznej symulacji w dwóch wariantach. W przypadku elementów wykonanych ze stali HC380LA i DP600 można zaobserwować wyraźną poprawę jakości otrzymanych wyników dla wariantu drugiego. Uwzględniając odkształcenia zadane w procesie wytwarzania elementu, uzyskano znacznie lepszą zgodność obliczonych sił z wartościami uzyskanymi z symulacji fizycznych. Na rys. 10 porównano skrócenie elementu oraz siłę średnią – tu również widoczna jest poprawa jakości otrzymanych wyników dla wariantu drugiego obliczeń dla stali HC380LA i DP600. Nie zaobserwowano takiej prawidłowości dla stali TRIP, co prawdopodobnie jest spowodowane nieuwzględnieniem rozpadu austenitu szczątkowego.




Rys. 9. Przebieg sił podczas testu zderzeniowego dla elementu wykonanego ze stali: *a*) HC380LA, *b*) DP600, *c*) TRIP




Rys. 10. Skrócenie średnie (*a*) i średnia siła (*b*) z doświadczenia oraz obliczeń

## Podsumowanie

W pracy opisano numeryczny model procesu kształtowania oraz eksploatacji wybranej części nadwozia samochodowego odpowiedzialnej za pochłanianie energii podczas kolizji. Model zweryfikowano doświadczalnie, a obliczenia wykonano dla dwóch wariantów: z pominięciem odkształceń materiału powstałych na etapie kształtowania elementu oraz z uwzględnieniem procesu jego tłoczenia (tzn. wzięto pod uwagę całą historię odkształcenia elementu na poszczególnych etapach jego tłoczenia). Analiza uzyskanych wyników pozwoliła na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Uwzględnienie umocnienia materiału, jakie następuje w czasie kształtowania elementu, zwiększa dokładność symulacji. W drugim wariancie uzyskano poprawę dokładności obliczeń numerycznych i lepszą zgodność z przeprowadzonymi doświadczeniami dla elementów ze stali HC380LA i DP600.
- W symulacjach typu *crash test* często pomija się historię procesu kształtowania elementów, co skutkuje błędnymi wynikami. Jeżeli proces przemysłowy składa się z kilku etapów, wartości parametrów decydujących o własnościach materiału należy „przenosić" z jednego procesu do drugiego – dzięki temu wyniki symulacji numerycznych będą bardziej zbliżone do otrzymanych w symulacjach fizycznych.
- W przypadku stali TRIP nie uzyskano poprawy dokładności wyników w drugim wariancie obliczeń – prawdopodobnie z powodu nieuwzględnienia rozpadu austenitu szczątkowego. Ten problem będzie przedmiotem dalszych badań.

LITERATURA

1. Gronostajski Z., Niechajowicz A., Polak S. "Prospects for the use of new-generation steels of the AHSS type for collision energy absorbing components". *Archives of metallurgy and materials*. 55 (2010): pp. 221÷230.
2. Hofmann H., Mattissen D., Schaumann T.W. "Advanced cold rolled steels for automotive applications". *Steel Research International*. 80 (2009): pp. 22÷28.
3. Kuziak R., Kawalla R., Waengler S. "Advanced high strength steels for automotive industry". *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 8 (2008): pp. 103÷117.
4. Matlock D.K., Krauss G., Speer J.G. "New microalloyed steel applications for the automotive sector". *Materials Science Forum.* 500–501 (2005): pp. 87÷96.
5. Biradar G., Anjan Babu V.A. "Automotive crash box performance analysis and simulation during frontal rigid barrier crash". *International Journal of Science and Research.* 3 (2014): pp. 1431÷1437.
6. Kuziak R., Pietrzyk M. "Physical and numerical simulation of the manufacturing chain for the DP steel strips, steel research international". *Special edition conf. ICTP.* (2011): pp. 756÷761.
7. Ambroziński M., Niechajowicz A., Gronostajski Z., Kuziak R., Chorzępa W., Pietrzyk M. "Numerical simulation of manufacturing of the crash box made of DP steel". *Steel Research International. Spec. issue conf. Metal Forming*. (2012): pp. 1291÷1294.
8. Shi M., Thomas G.H., Chen X.M., Fekete J.R. "Formability performance comparison between Dual Phase and HSLA Steels". *Proc. 43rd Conf. Mechanical Working and Steel Processing, Charlotte, Iron & Steel Society.* 39 (2001): pp. 165÷174.
9. Matlock D.K., Speer J.G. "*Third generation of AHSS: Microstructure design concepts*". Springer, 2009, pp. 185÷205.
10. Gronostajski Z., Polak S. "Comparison of Impact Energy Absorption by Double-Hat Thin-Walled Specimens Made of HSLA Steel Joined by Clinching and Spot Welding". *Steel Research International.* 81 (2010): pp. 1132÷1135. ■