

Otrzymano: 19 czerwca 2017 / Zaakceptowano: 18 października 2017 / Zamieszczono na WWW: 17 listopada 2017

*łocznictwo, stale o superwysokiej wytrzymałości
AHSS, metoda elementów skończonych*

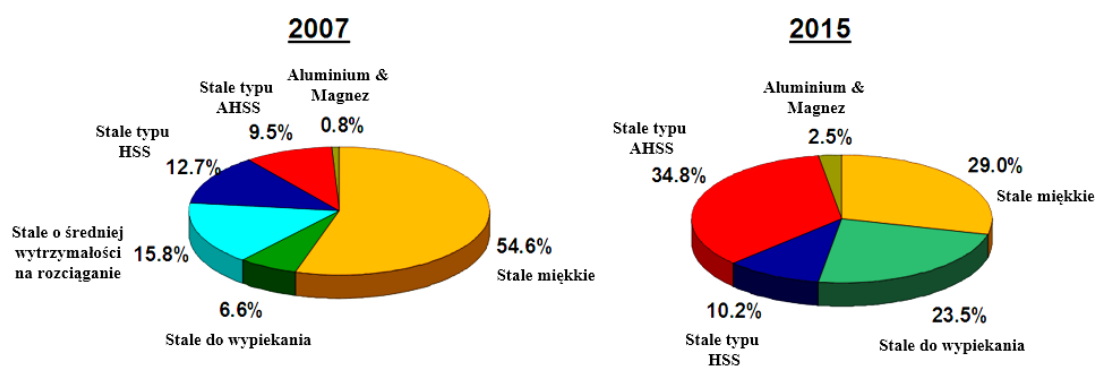
Kamil WYROBEK^{1*}

MODELOWANIE PROCESU TŁOCZENIA CZĘŚCI NADWOZIA SAMOCHODU ZE STALI SUPERWYSOKO WYTRZYMAŁEJ

W artykule przedstawiono model procesu tłoczenia przykładowej części nadwozia samochodu z superwysoko wytrzymałej blachy stalowej typu AHSS (*Advanced High-Strength Steels*). W tym celu zostały przeprowadzone badania materiałowe stali DP600, na podstawie których wykonano symulacje procesu tłoczenia. Opracowany proces może stanowić ekonomicznie uzasadnioną alternatywę dla kosztownych procesów obróbki plastycznej na gorąco czy hydroformowania.

1. WPROWADZENIE

Ciągłe obniżanie norm emisji spalin oraz zużycia paliwa przez samochody, doprowadziło do sytuacji, w której kluczowym zagadnieniem stała się masa pojazdu. W celu jej minimalizacji stosowane są coraz nowocześniejsze materiały konstrukcyjne o stosunkowo niskim współczynniku ciężaru właściwego do wytrzymałości. Jak przedstawiono na rysunku 1 jeszcze w 2007 r. stale typu AHSS stanowiły ok. 9,5% całkowitego udziału w strukturze nadwozia, natomiast już w 2015 zawartość ta wynosiła ponad 34,8%.



Rys. 1. Procentowy udział poszczególnych materiałów w strukturze nadwozia samochodu [1]
Fig. 1. Percentage participation of individual materials in car body structure [1]

¹ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji

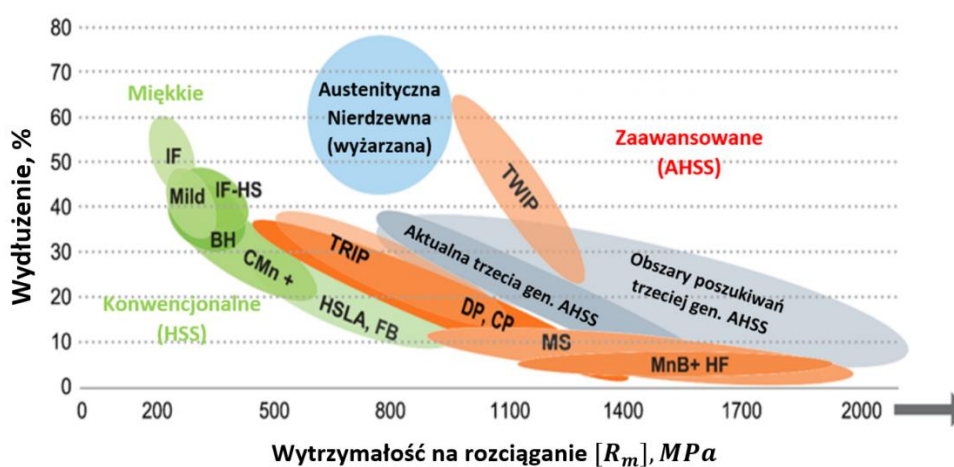
* E-mail: kwyrobek@ath.bielsko.pl

2. STALE STOSOWANE W PRZEMYSŁE MOTORYZACYJNYM

Współcześnie stosowane stale w przemyśle motoryzacyjnym można podzielić na [2]:

- *stale miękkie*, o wytrzymałości na rozciąganie R_m poniżej 300 MPa i wydłużeniu A_{80} powyżej 30%, niskowęglowe, plastyczne (IF, MILD),
- *stale konwencjonalne*, o wytrzymałości na rozciąganie R_m od 300 do 700 MPa i wydłużeniu A_{80} od 10% do 30% (HSS: IF-HS, BH, CMn, HSLA, FB),
- *stale zaawansowane*, o bardzo wysokiej wytrzymałości na rozciąganie R_m powyżej 700 MPa i wydłużeniu A_{80} w zakresie 5% - 30% (AHSS: TRIP, DP, CP, MS).

Na rysunku 2 przedstawiono porównanie właściwości stali wykorzystywanych na części nadwozi samochodowych.



Rys. 2. Właściwości stali przeznaczonych na części nadwozia [3]

Fig. 2. Properties of steel used for car body components [3]

Stale miękkie oraz stale konwencjonalne są bardzo popularne w przemyśle motoryzacyjnym. Wykorzystywane one są przede wszystkim do głęboko tłoczonych paneli zewnętrznych (IF, MILD), różnego typu wsporników oraz części łączących (HSS: IF-HS, BH, CMn, HSLA, FB). Superwysoko wytrzymałe stale są umacniane poprzez transformację fazową, a nie jak w przypadku stali konwencjonalnych umocnienie dyspersyjne czy roztworowe. Stale z gatunku DP, CP, MS umacniają się już na etapie ich przygotowania, natomiast dla stali z efektem TRIP/TWIP podczas ich formowania oraz podczas wystąpienia kolizji drogowej [2]. Ze względu na swoje właściwości, stale typu AHSS znalazły szerokie zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym. Wykorzystywane są do tłoczenia przede wszystkim części strukturalnych (rys. 3), części zawieszenia oraz siedzeń.

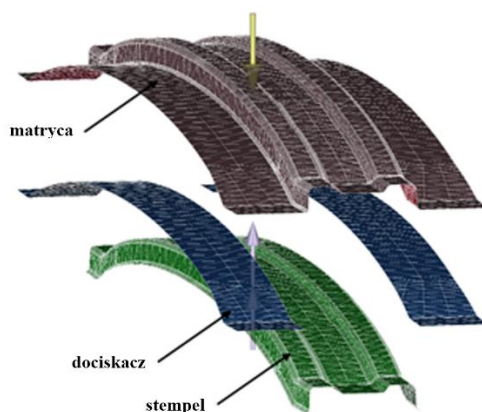
Potrzeba obniżenia masy samochodu, przy jednoczesnym zachowaniu sztywności wymusza na konstruktorach stosowanie, na części struktury nadwozi, blach o coraz mniejszej grubości i wyższej wytrzymałości na rozciąganie. Obie te cechy w połączeniu ze skomplikowanym kształtem części nadwozia, powodują znaczne problemy podczas projektowania procesów wytwarzania. W celu obniżenia ryzyka związanego z pękaniem lub fałdowaniem wytłoczek już na wstępnym etapie projektowania procesu stosowane jest oprogramowanie wykorzystujące metodę elementów skończonych lub różnic skończonych.



Rys. 3. Zastosowanie stali typu AHSS w przemyśle motoryzacyjnym [4]
Fig. 3. Application of AHSS steel in the automotive industry [4]

3. MODEL PROCESU TŁOCZENIA BELKI PRZEDNIEJ

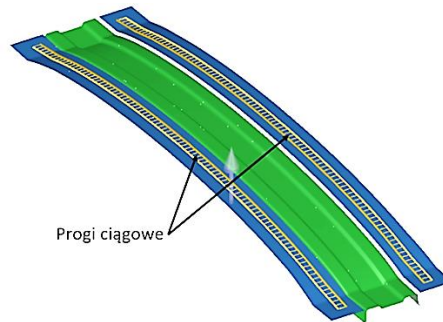
Proces tłoczenia opracowano na podstawie modelu geometrycznego 3D CAD, wynikającego bezpośrednio z budowy nadwozia samochodowego. Geometria części może być przygotowana w dowolnym oprogramowaniu 3D CAD, pozwalającym na eksport geometrii do jednego ze standardowych formatów np. *.stp lub *.igs. Wstępnie zamodelowany proces tłoczenia w znacznym stopniu zależy od doświadczenia konstruktora oraz innych czynników ograniczających takich jak: wielkość stołu prasy czy jej maksymalny nacisk. Ze względu na wysoki priorytet operacji wytłaczania, od której w głównej mierze zależy czy część będzie wolna od wad przeprowadzono badania materiałowe stali superwysoko wytrzymałej DP600 oraz symulację procesu wytłaczania. W tym celu zamodelowano powierzchnie styku stempla, matrycy oraz dociskacza z wytłóczką [5]. Następnie modele geometryczne narzędzi zostały zaimportowane do programu AutoForm w celu przeprowadzenia analizy z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych (rys. 4).



Rys. 4. Modele MES narzędzi formujących tłocznika
Fig. 4. FEM model of forming elements

Do dyskretyzacji układu zostały wykorzystane elementy skończone 3-węzłowe z liniowymi funkcjami kształtu typu BEM-5 (Bending Enhanced Membrane).

Ze względu na duże wymiary elementu, do symulacji dodano progi ciągowo mające za zadanie wytworzenie dodatkowych sił, ograniczających nadmierne płynięcie materiału. Rozmieszczenie progów na dociskaczu przedstawiono na rysunku 5.



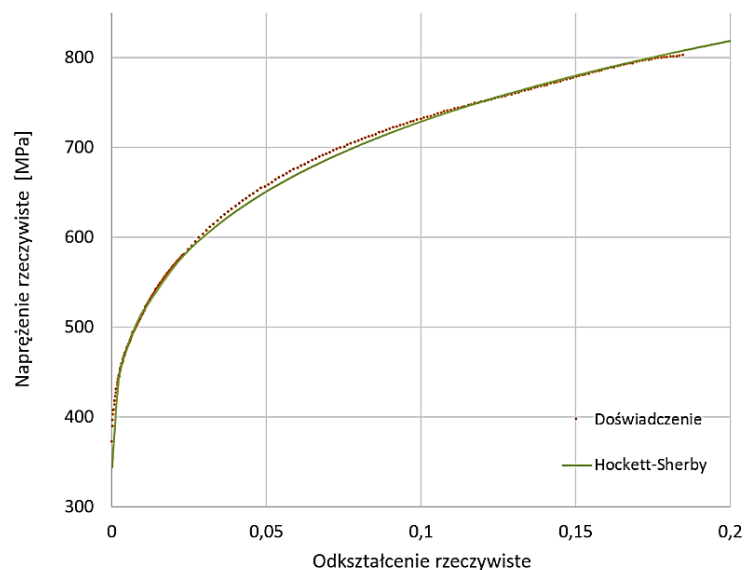
Rys. 5. Rozmieszczenie progów ciągowych na dociskaczu
Fig. 5. Arrangement of drawbeads on binder

Jako materiał do badań wybrano stal typu AHSS gatunku: DP600 dla której przyjęto model materiału anizotropowego w płaskim stanie naprężenia i odkształcenia Hilla. Do wyników uzyskanych ze statycznej próby rozciągania metodą najmniejszych kwadratów dopasowano model krzywej materiałowej Hockett-Sherby'ego wyrażający się wzorem (1):

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_{sat} - (\sigma_{sat} - \sigma_e) \cdot e^{-a\varepsilon^p} \quad (1)$$

gdzie: σ – naprężenie, ε – odkształcenie plastyczne, $a, p, \sigma_{sat}, \sigma_e$ – obliczane parametry.

Na rysunku 6 przedstawiono dopasowany do wyników badań model krzywej umocnienia.



Rys. 6. Dopasowany model krzywej umocnienia
Fig. 6. Fitted model of strengthening curve

Na podstawie dopasowanej krzywej umocnienia (rys.6) określono wartości parametrów σ_{Sat} , σ_e , a , p , które zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry modelu krzywej umocnienia Hockett-Sherby'iego
Table 1. Parameters of Hockett-Sherby strengthening curve

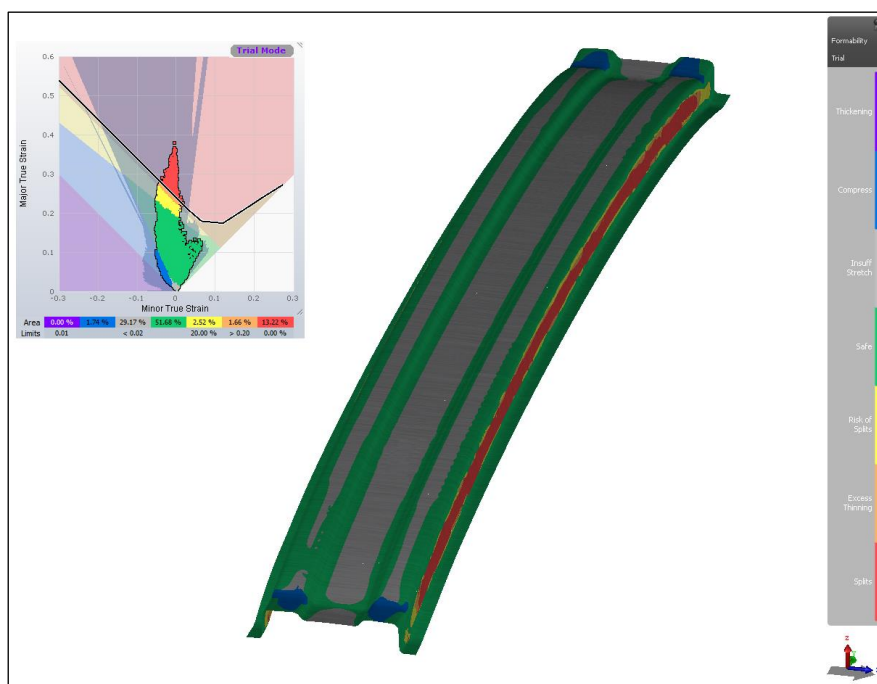
σ_{Sat} , MPa	σ_e , MPa	a	p	R^2
1338,28	381,23	1,242	0,403	0,9802

Ponadto na podstawie statycznej próby rozciągania określono parametry Lankford'a [6] (tabela 2) w celu wyznaczenia kryterium plastyczności Hill'a. Następnie wszystkie uzyskane parametry materiałowe zostały wprowadzone do bazy materiałowej programu.

Tabela 2. Zestawienie uzyskanych parametrów σ_0 , R_0 , R_{45} oraz R_{90}
Table 2. Summary of obtained parameters σ_0 , R_0 , R_{45} oraz R_{90}

σ_0 , MPa	R_0	R_{45}	R_{90}
373,1	0,843	1,21	1,072

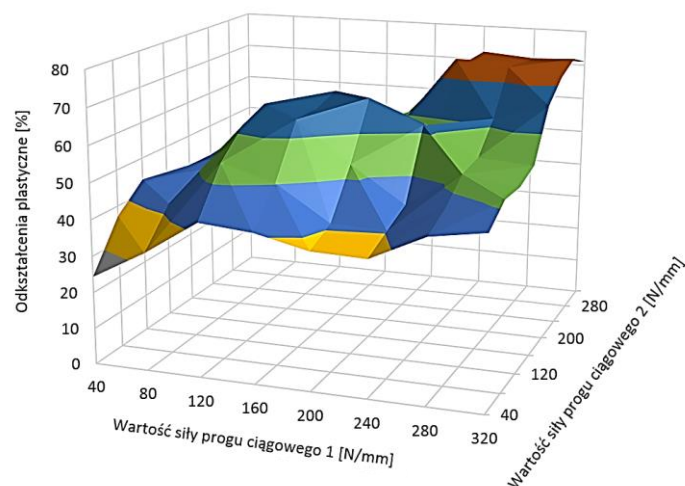
W kolejnym kroku zdefiniowano kształt płaskiej formatki, z jakiej miała być wykonana część, prędkość tłoczenia wynoszącą $0,5 \frac{m}{s}$ [6], model tarcia Coulomba o współczynniku 0,15 oraz siły progów ciągowych na poziomie $200 \frac{N}{mm}$. Na rysunku 7 przedstawiono wynik pierwszej przeprowadzonej analizy, które wskazują na występowanie dwóch obszarów zagrożonych pękaniem.



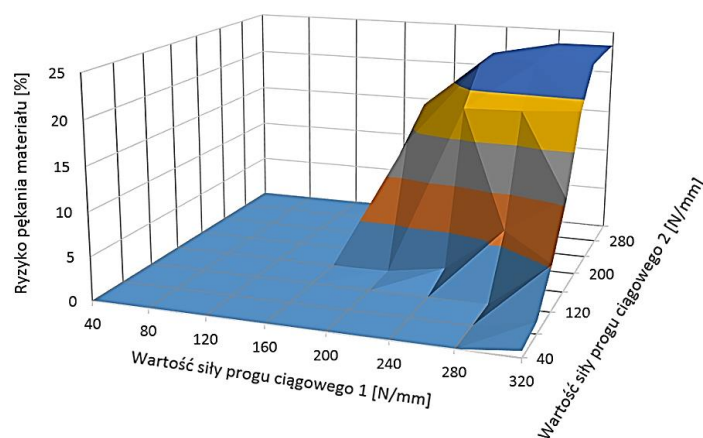
Rys. 7. Wynik symulacji dla wstępnych parametrów projektowych
Fig. 7. Simulation results for initial design parameters

Krzywa odkształceń granicznych została wyznaczona przy pomocy modelu Arcelor V9 FLC (F. Cayssials). W tym celu jako parametrów wejściowych użyto wytrzymałości na rozciąganie R_m oraz wydłużenia A_g próbki wyciętej pod kątem 90° do kierunku walcowania [7,8].

Głównymi czynnikami jakie mogą mieć wpływ na wysoki udział powierzchni zagrożonej pękaniem są: siła progów ciągowych, współczynnik tarcia oraz siła dociskacza. Największy, z pośród wymienionych powyżej, wpływ na odkształcenie plastyczne ma siła progów ciągowych. W celu poprawienia jakości wytłoczki przeprowadzono szereg symulacji mających na celu wyznaczenie wpływu wartości sił progów ciągowych na odkształcenie plastyczne oraz ryzyko pęknięć, wyrażone udziałem powierzchni zagrożonej pękaniem lub powierzchni odkształconej plastycznie do powierzchni całkowitej wytłoczki. Siły progów ciągowych były badane w zakresie 40 – 320 N/mm. Wyniki przedstawione na rysunku 8 obrazują stosunek procentowy powierzchni odkształconej plastycznie do powierzchni całkowitej. Natomiast na rysunku 9 został przedstawiony stosunek procentowy powierzchni zagrożonej pękaniem do powierzchni całkowitej wytłaczanej części.

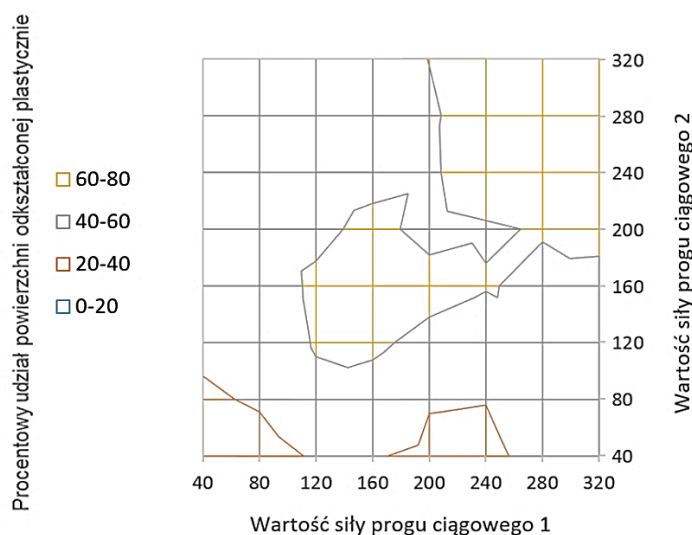


Rys. 8. Wpływ siły progów ciągowych na procentowy udział powierzchni odkształconej plastycznie
Fig. 8. Influence of drawbeads force on percentage of plastic deformation area



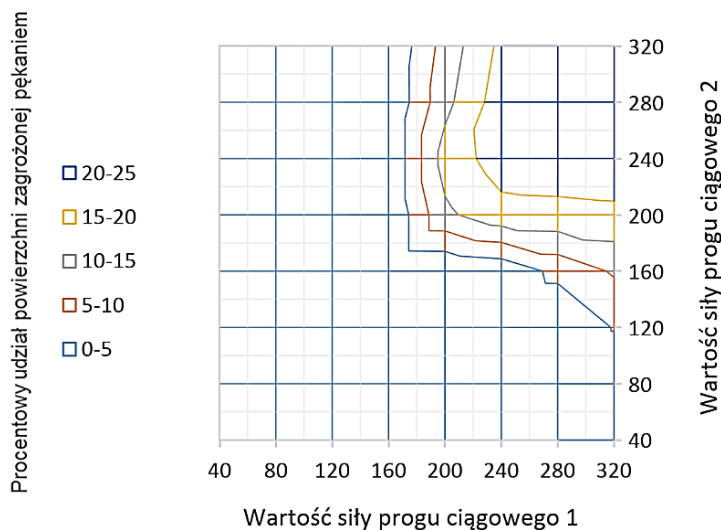
Rys. 9. Wpływ siły progów ciągowych na procentowy udział powierzchni zagrożonej pękaniem
Fig. 9. Influence of drawbeads force on percentage of cracking risk area

Rysunek 10 przedstawia wykres konturowy wpływu progów ciągowych na procentowy udział powierzchni odkształconej plastycznie. Wskazuje on, że najwyższe wartości procentowe występują w centralnej części wykresu oraz w miejscu maksymalnych wartości sił.



Rys. 10. Wykres konturowy wpływu siły progów na procentowy udział powierzchni odkształconej plastycznie
Fig. 10. Contour plot influence of drawbeads force on percentage of plastic deformation area

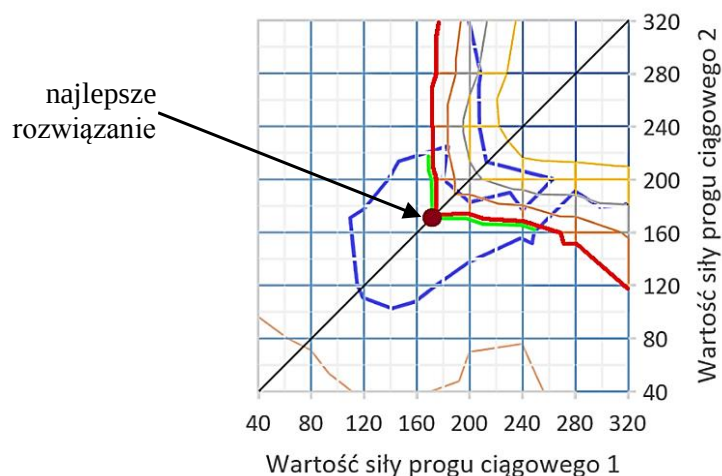
Z kolei największy udział procentowy powierzchni zagrożonej pękaniem występuje dla wartości sił progów ciągowych powyżej 160 N/mm, co przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Wykres konturowy wpływu siły progów na procentowy udział powierzchni zagrożonej pękaniem
Fig. 11. Contour plot influence of drawbeads force on percentage of cracking risk area

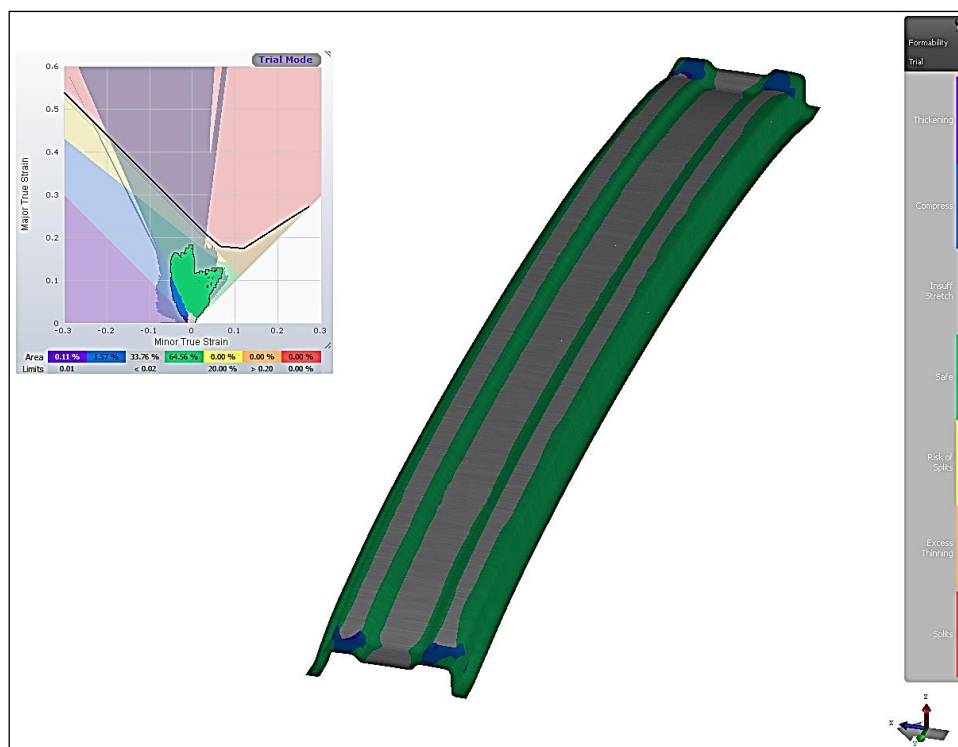
Najlepsze rozwiązanie (rys. 12) zostało wyznaczone poprzez złożenie obu wykresów konturowych (rys. 10 i rys. 11), przy założeniu dodatkowego warunku o równości sił progów, ze względu na możliwość przeciągania blachy w stronę progów o większej sile. Brak

symetryczności geometrii elementu powoduje, że również wyniki nie są symetryczne względem przekątnej, zaznaczonej na wykresie.



Rys. 12. Złożenie wykresów konturowych
Fig. 12. Assembly of contour plots

Wynik symulacji dla sił progów ciągowych równych $162 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$ przedstawiono na rysunku 13. Dzięki przeprowadzonym symulacjom procesu, wyeliminowano całkowicie ryzyko pęknięcia, uzyskując odkształcenie plastyczne na $\sim 65\%$ całkowitej powierzchni wytłoczki.



Rys. 13. Wynik symulacji dla wyznaczonych parametrów
Fig. 13. Simulation results for designated parameters

4. PODSUMOWANIE

Przedstawiony tok postępowania pozwala na znaczne ograniczenie ryzyka potencjalnych pęknięć mogących wystąpić podczas wykonywania prototypów lub produkcji seryjnej belki zderzaka. W związku z tym, że parametry modelu materiałowego wyznaczone na podstawie badań doświadczalnych mogą się istotnie różnić od parametrów modeli materiałowych dostarczanych przez producentów oprogramowania, wykonano próby statycznego rozciągania stali DP600, które pozwoliły na uzyskanie rzeczywistego modelu materiałowego wykorzystanego podczas przeprowadzania symulacji tłoczenia zderzaka. Uzyskane wyniki symulacji procesu pozwalają na wytwarzanie, odpowiadających za bezpieczeństwo, części struktur karoseryjnych samochodów ze stali superwysoko wytrzymałych typu DP600. To z kolei wskazuje na znaczne pole do rozwoju technologii tłoczenia na zimno i w efekcie na możliwość konkurencyjności z technologiami tłoczenia na gorąco oraz z hydroformowaniem.

LITERATURA

- [1] APARECIDA DA SILVA E., 2016, *The study of the correlation between hardening models and the crystallographic characteristics in advanced high-strength steels submitted to the springback effect*, PHD thesis, São Paulo State University.
- [2] SENKARA J., 2009, *Współczesne stale karoseryjne dla przemysłu motoryzacyjnego i wytyczne technologiczne ich zgrzewania*, Przegląd Spawalnictwa, 11, 3-7.
- [3] Worldautosteel, Serwis internetowy: <http://www.worldautosteel.org>, (dostęp na dzień: 03.04.2017).
- [4] Strona producenta samochodów: <http://www.mazda.com>, (dostęp na dzień: 03.04.2017).
- [5] STADNICKI J., WRÓBEL I., 2015, *Wykorzystanie optymalizacji w projektowaniu tłoczni do blach karoseryjnych*, Mechanik, 7, 779-788.
- [6] KURZYDŁOWSKI K. J., 1993, *Mechanika materiałów*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa,
- [7] ABSPOEL M., DROOG J.M.M., SCHOLTING M.E., 2013, *A new method for predicting Forming Limit Curves from mechanical properties*, Journal of Material Processing Technology, 213/5, 759-769.
- [8] AutoForm R6 user's guide.

PROCESS MODELING OF CAR BODY PART MADE FROM ADVANCED HIGH STRENGTH STEEL SHEET

The article presents process of sample car body part made from advanced high strength steel sheet (AHSS). For this purpose conducted research tensile strength of DP600 steel and based on them simulations of forming process. Developed process may constitute an economically viable alternative to the costly hot forming and hydroforming processes.

Keywords: *sheet metal forming, advanced high strength steels, AHSS, FEM*