

# Efekt sprężynowania belki zderzaka samochodu osobowego dla metody formowania na zimno i na gorąco

## Springback phenomenon of vehicle's bumper in cold and hot forming methods

PAWEŁ BAŁON  
ANDRZEJ ŚWIĄTONIOWSKI  
EDWARD REJMAN  
BARTŁOMIEJ KIEŁBASA  
ROBERT SMUSZ  
JANUSZ SZOSTAK  
ŁUKASZ KOWALSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.7.48>

Aby sprostać rosnącym wymaganiom dotyczącym przemysłu samochodowego, wprowadzanym przez dyrektywy i wytyczne Unii Europejskiej w zakresie zwiększania bezpieczeństwa i obniżania limitów emisji dwutlenku węgla, firmy z branży motoryzacyjnej wdrażają nowe materiały i technologie produkcji. Prym wiodą dwa trendy w wytwarzaniu elementów karoserii: tłoczenie na zimno stali o wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  do 1600 MPa oraz tłoczenie na gorąco stali o wytrzymałości  $R_m$  do 1800÷2000 MPa. Najwięksi europejscy producenci części samochodowych stanęli przez wyzwaniem związanym z projektowaniem i wytwarzaniem narzędzi do tłoczenia na gorąco. Jest to jedna z najnowocześniejszych technologii tłoczenia wdrażana od kilku lat w innowacyjnych zakładach w Europie i USA. Projektowanie, badania i testy tego typu narzędzi są realizowane przez firmy o zaawansowanych możliwościach produkcyjnych. Zastosowanie tego typu technologii zwiększa poziom innowacyjności produktów ze względu na *know-how*, jakim dysponują firmy dla tak skomplikowanych narzędzi, pomimo że koszty narzędzi znacznie przekraczają koszty standardowych tłoczników. Konkurencja na rynku europejskim w produkcji części w procesie *hot forming* nie jest jeszcze duża.

**SŁOWA KLUCZOWE:** sprężynowanie, formowanie na gorąco, formowanie na zimno, UHSS

*In order to meet the increasing requirements introduced by European Union directives and guidelines for the automotive industry, in the area of increasing safety while constantly reducing carbon dioxide emission limits, companies in the automotive industry implement new materials and new technologies for production. Currently, two trends are propagated in the way of manufacturing car body elements: the cold forming process of steel with a tensile strength  $R_m$  up to 1600 MPa and the hot forming process of steel with a strength  $R_m$  of up to 1800-2000 MPa. The largest European manufacturers of car parts must meet the design and manufacture of hot forming tools. It is one of the most modern pressing technologies implemented for several years in innovative plants located both in Europe and the USA. Designing and testing of this type of*

*tools are carried out by companies with advanced technological production capabilities. The use of this type of technology increases the level of product innovation, due to the know-how of companies for such complex tools, despite the fact that the costs of tools significantly exceed the costs of standard dies. The competition on the European market in the production of parts in hot forming process is not so large at the moment.*

**KEYWORDS:** springback, hot forming, cold forming, UHSS

### Problemy technologiczne przy tłoczeniu na zimno mocno obciążonych elementów samochodowych

Technologia formowania na zimno polega na tłoczeniu stali w temperaturze poniżej temperatury rekrytalizacji. Aby zapewnić odpowiednią nośność kluczowych elementów konstrukcyjnych samochodu, narażonych na duże obciążenia (np. belki zderzaka), wytwarza się je z materiałów o odpowiedniej wytrzymałości, takich jak stal HCT780X o granicy wytrzymałości  $R_m$  powyżej 780 MPa (rys. 1).

Użycie wysoko wytrzymałej stali wzmaga intensywność efektu sprężynowania. Problem pojawia się zarówno podczas obróbki oraz kontroli tych elementów, jak i w trakcie montażu formowanych części w podzespoły. Utrzymanie małych tolerancji dla elementów wykonanych ze stali HSS (*high strength steel*) lub stali zaawansowanych AHSS (*advanced high strength steel*) jest trudne, zwłaszcza gdy materiał ma tendencję do deformacji sprężystej podczas cięcia lub odciążania po procesie formowania.

Sprężynowanie to proces elastycznego powrotu z lokalną plastyczną deformacją, ujawniającą się na końcu procesu. W przypadku narzędzi wielooperacyjnych sprężynowanie pojawia się również podczas operacji pośrednich, lecz dopuszcza się lokalną odchyłkę, kontrolując jedynie efekt końcowy [1, 3].

Przedmiotem badań była belka zderzaka formowana w procesie na zimno za pomocą sztywnego stempla i sztywnej matrycy bez siły docisku, tzw. metodą *crashforming* (rys. 2). Podczas projektowania narzędzia tłoczącego

\* Dr inż. Paweł Bałon, p.balon@szel-tech.pl, <https://orcid.org/0000-0003-3136-7908> – SZEL-TECH Szeliga Grzegorz, Mielec, Polska; Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Kraków, Polska

Prof. dr hab. inż. Andrzej Świątoniowski, swiatoni@imr.agh.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-4832-3418> – Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Kraków, Polska

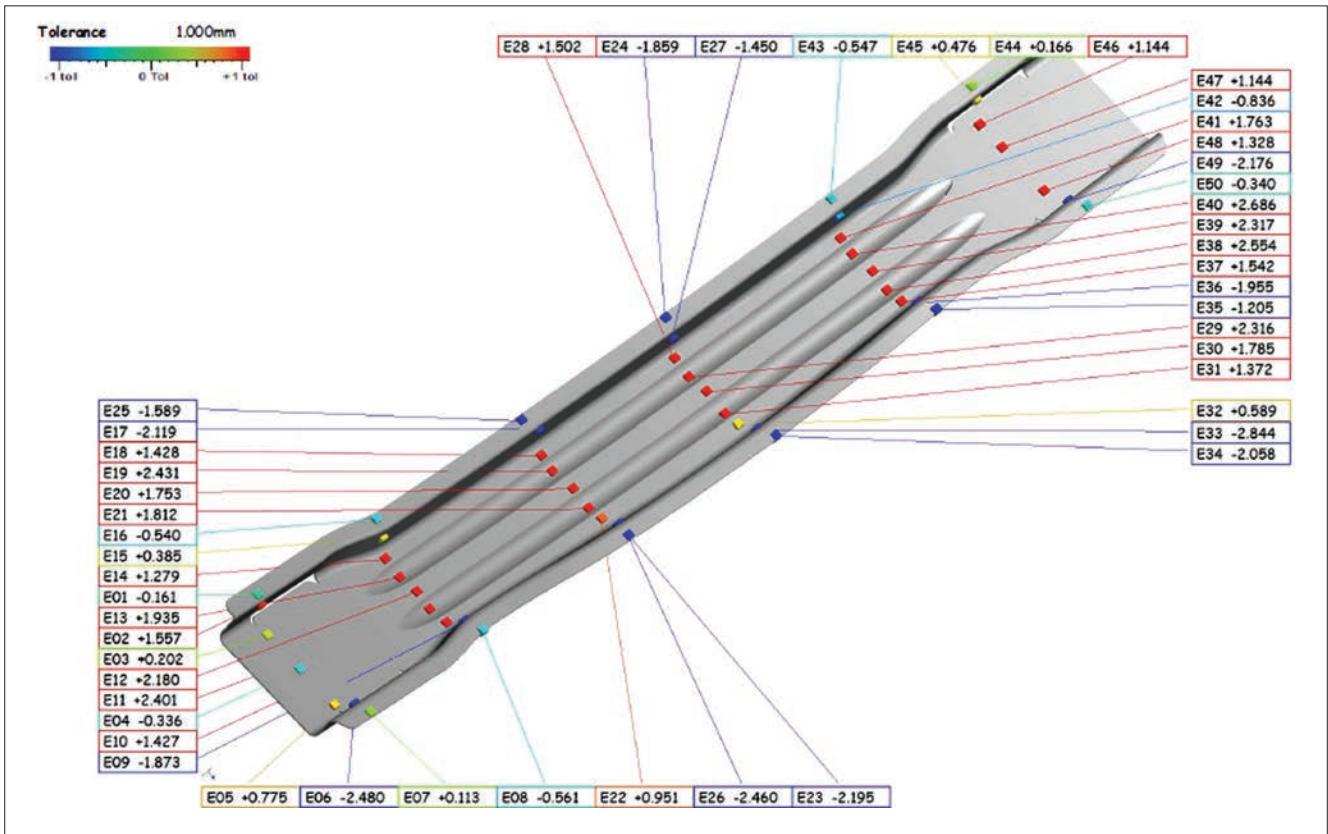
Dr inż. Edward Rejman, erejman@prz.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-4716-7613> – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Rzeszów, Polska

Mgr inż. Bartłomiej Kielbasa, b.kielbasa@szel-tech.pl, <https://orcid.org/0000-0002-3116-2251> – SZEL-TECH Szeliga Grzegorz, Mielec, Polska

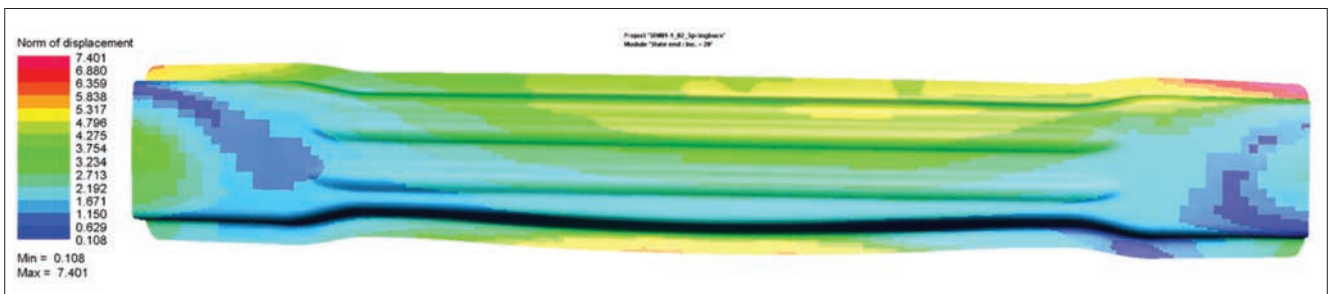
Dr inż. Robert Smusz, robsmusz@prz.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0001-7369-1162> – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Rzeszów, Polska

Dr inż. Janusz Szostak, szostak@agh.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-7789-3383> – Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Kraków, Polska

Mgr inż. Łukasz Kowalski, lkowalski@agh.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-2866-9000> – Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Kraków, Polska



Rys. 1. Wyniki pomiaru metodą CMM belki zderzaka wykonanej w technologii formowania na zimno



Rys. 2. Analiza MES – ocena sprężynowania belki zderzaka [mm]

do belki jego geometria trzykrotnie ewaluowała w sposób znaczący, aby zmieścić się w granicach nałożonej tolerancji. Zmiany te były konieczne ze względu na strategiczne znaczenie części w przypadku czołowego zderzenia pojazdu. Wynikały one z braku dostatecznej sztywności elementu podczas testów zderzeniowych. Niestety nowa geometria sprzyjała powstawaniu sprężynowania o wartości powyżej 2,8 mm (rys. 1) oraz dużej tendencji do fałdowania materiału [2]. Z tych powodów konieczne było przeprowadzenie wielu analiz tłoczności metodą na zimno ze szczególnym naciskiem na problem sprężynowania. W badaniach teoretycznych zaproponowano kilka modeli materiałowych oraz wykonano kilkanaście prób numerycznych, aby ocenić sprężynowanie, przy czym jego największa wartość przekroczyła 7 mm (rys. 2).

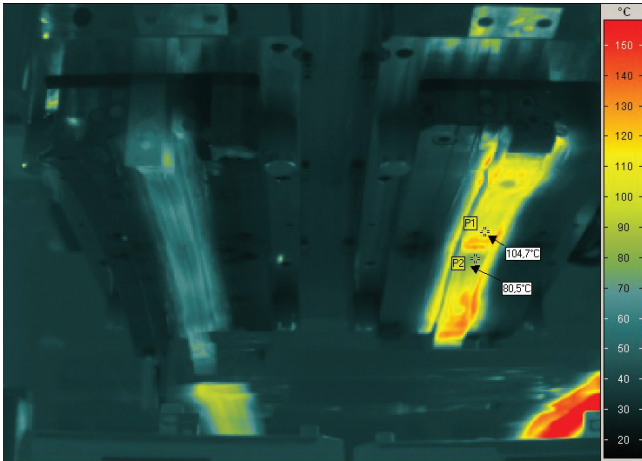
Konieczność zachowania tolerancji geometrycznych nieważkich elementów pojazdów samochodowych wymaga zastosowania technologii pozwalającej spełnić te wymagania. Takie możliwości daje technologia tłoczenia na gorąco. Jest ona coraz częściej wykorzystywana przez producentów części samochodowych do wytwarzania elementów struktury nośnej samochodów wchodzących w skład tzw. klatki bezpieczeństwa pojazdu. Są to ele-

menty nośne karoserii, takie jak: słupki boczne, zderzaki, wzmocnienia dachu, podłogi, drzwi, belki podłużne, obramowania drzwi, progi i ścianki przednie kabiny [4].

Większość części karoserii samochodowych wykonuje się ze stali o wytrzymałości  $R_m = 700 \div 1400$  MPa, natomiast stale do tłoczenia na gorąco pozwalają na uzyskanie wytrzymałości rzędu  $R_m = 1500 \div 2200$  MPa. Aby obniżyć ciężar konstrukcji karoserii, a jednocześnie spełnić wymogi związane z poprawą bezpieczeństwa pasażerów w przypadku kolizji, producenci samochodów stosują cięższe elementy, ale z materiałów o bardzo wysokiej wytrzymałości.

Części tłoczone na gorąco osiągają wymaganą wytrzymałość dzięki równoczesnemu hartowaniu (rys. 4). Stale o tak wysokiej wytrzymałości nie zawsze mogą być tłoczone na zimno, ponieważ zwykle mają niski współczynnik wydłużenia, a podczas tłoczenia pękają, uniemożliwiając osiągnięcie oczekiwanego kształtu.

Aby uzyskać odpowiednią geometrię wyrobu z materiałów o podwyższonej wytrzymałości, podgrzewa się wcześniej ucięte wsady do temperatury ok.  $900^\circ\text{C}$ , a następnie – po włożeniu do narzędzia i wytłoczeniu – schładza się je bardzo szybko do temperatury  $140 \div 150^\circ\text{C}$  (rys. 3).



Rys. 3. Analiza rozkładu temperatury w elemencie tłoczonym na gorąco z zastosowaniem termowizji

Wysoką wytrzymałość uzyskuje się pod warunkiem zachowania szybkości chłodzenia minimum  $27^{\circ}\text{C}$  na sekundę, przy czym czynnik chłodzący nie może się bezpośrednio stykać z częścią. Osiąga się to poprzez specjalną konstrukcję narzędzi tłocznych z siecią kanałów chłodzących rozłożonych równomiernie względem kształtu części i możliwie najbliższej powierzchni kształtujących, przez które przepływa w sposób ciągły płyn chłodzący pod zadanym ciśnieniem.

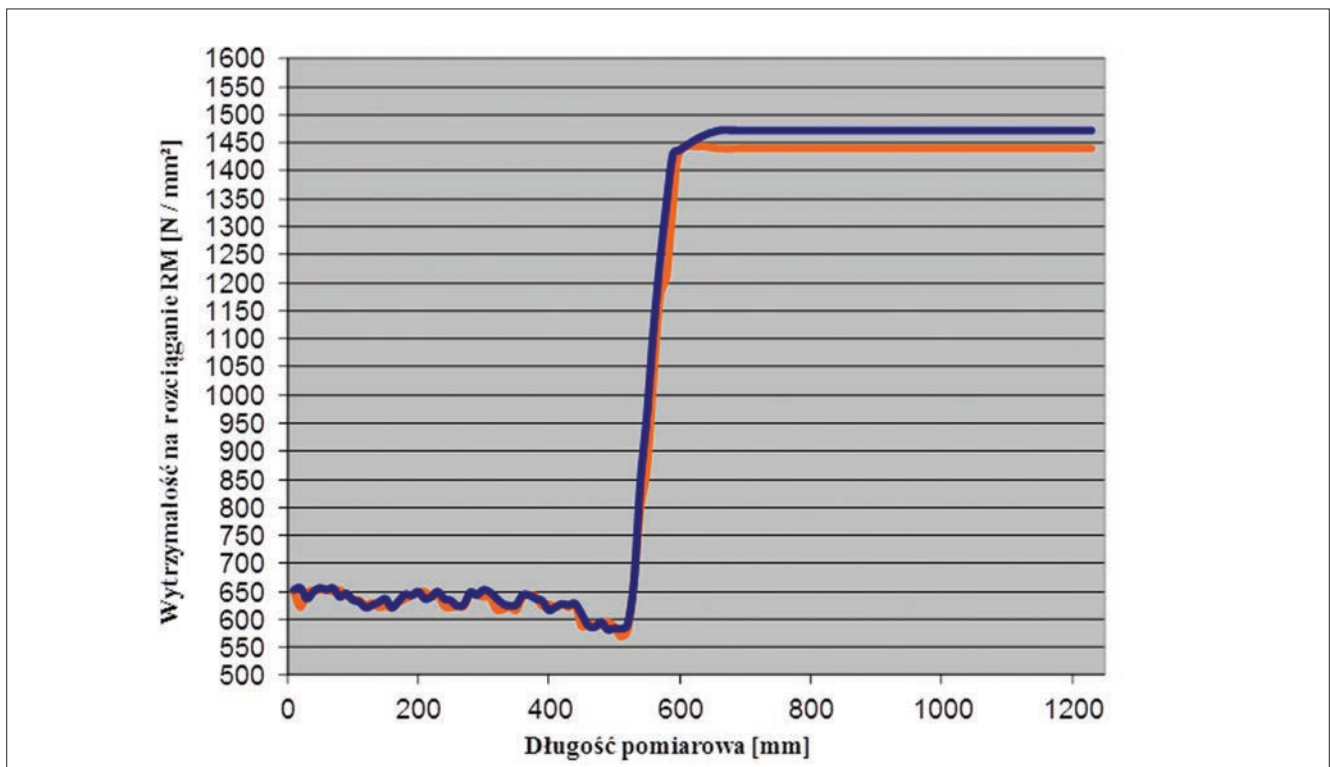
Proces nagrzewania części oraz czas ich wygrzewania w piecu aż do uzyskania struktury austenicznej muszą być ściśle sterowane i kontrolowane z użyciem specjalnych czujników i kamer termowizyjnych, które rejestrują rzeczywistą temperaturę części tuż przed zamknięciem narzędzia oraz po jego otwarciu. Tylko dokładne przestrzeganie reżimu temperatur i czasów poszczególnych etapów procesu gwarantuje właściwe parametry wytrzymałościowe wykonanej części. Każda odchyłka temperatury wykryta przez kamerę skutkuje odrzuceniem części jako złomu.

Aby nie następowało utlenianie powierzchni części przy tak wysokiej temperaturze, stosuje się zabezpieczenia poprzez pokrywanie blachy specjalnymi powłokami aluminowo-krzemowymi lub wprowadza się w piecu atmosferę ochronną z gazów obojętnych. Konstrukcja narzędzi musi gwarantować właściwy kształt części po schłodzeniu, czyli musi przewidywać współczynniki wydłużenia i skurczu podczas tłoczenia gorącej przygotówki, a następnie podczas jej szybkiego chłodzenia (min. 1%). Przed obróbką cieplno-plastyczną materiał ma strukturę ferrytyczno-perlityczną, natomiast po obróbce – zdecydowanie martenzytyczną. Zatem w wyniku procesu formowania na gorąco zmieniają się właściwości mechaniczne materiału wsadowego [6].

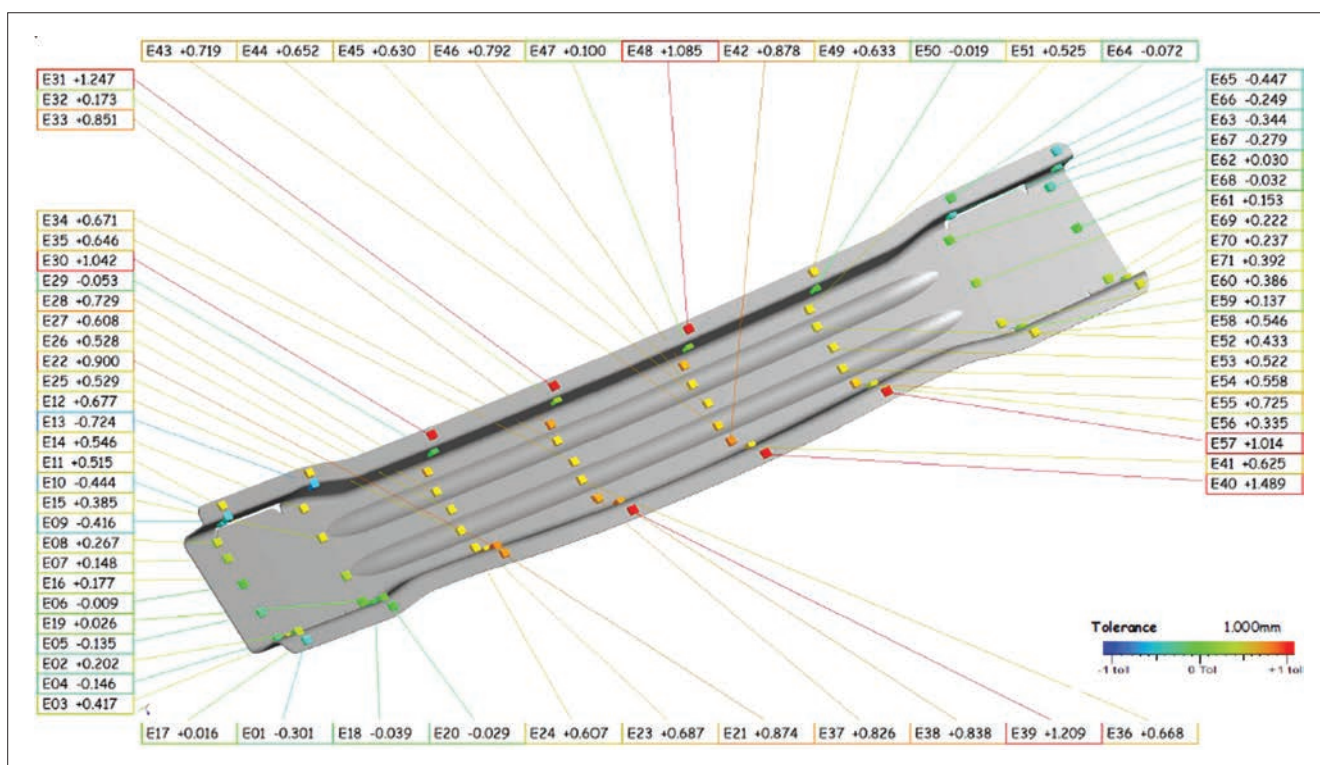
Proces tłoczenia na gorąco powinien być tak zaprojektowany, aby finalna wytłoczka nie miała wad w postaci pęknięć czy fałd oraz była wykonana z odpowiednią dokładnością kształtowo-wymiarową (podobnie jak w przypadku tłoczenia na zimno) i dodatkowo charakteryzowała się wymaganymi właściwościami mechanicznymi, tj. odpowiednimi wartościami  $R_e$ ,  $R_m$  i twardością oraz strukturą martenzytyczną. Ważnym elementem procesu tłoczenia na gorąco jest badanie mikroskopowe, które obrazuje, ile procent martenzytu wytworzyło się podczas hartowania, oraz twardość, do jakiej zahartowała się wytłoczka (HV).

Aby spełnić te wymagania, odpowiednio zaplanować proces technologiczny tłoczenia na gorąco i ustalić jego kluczowe parametry, niezbędne jest wykonanie analizy numerycznej MES całego procesu uwzględniającego parametry materiału zarówno dla przeróbki plastycznej, jak i obróbki cieplnej [8, 9].

Typowym elementem konstrukcji samochodu osobowego, wytwarzanym poprzez tłoczenie na gorąco, jest belka przedniego zderzaka. W rozważanym przykładzie belka zderzaka została wykonana z blachy o grubości 1,6 mm ze stali borowej 22MnB5 o granicy wytrzymałości  $R_m \approx 650 \text{ MPa}$  [7, 10].



Rys. 4. Wykres rozkładu wytrzymałości na rozciąganie w funkcji długości pomiarowej dla stali w technologii formowania na gorąco



Rys. 5. Wynik pomiaru belki zderzaka wykonanej w technologii formowania na gorąco

Proces kształtowania belki zderzaka odbywał się w następującej kolejności: najpierw docisk górny zamknął wsad w matrycy, potem stempel zamknął się z wsadem na docisku dolnym i razem z dociskiem dolnym zamknął się na stemple przez 15 s. Po wykonaniu tej operacji, po podniesieniu suwaka prasy, część o geometrii wytłoczonej w temperaturze 150°C uległa odsprężynowaniu o wartość maksymalną równą 1,45 mm, co zostało zmierzone na maszynie CMM (rys. 5). Dla tak zamodelowanego procesu tłoczenia na gorąco przeprowadzono tłoczenie belki zderzaka. Ocenę wymiarowo-kształtową przeprowadzono przez pomiar otrzymanego wyrobu na maszynie pomiarowej CMM, a wyniki pomiaru pokazano na rys. 5. Maksymalne sprężynowanie osiągnęło wartość 1,247 mm, co jest porównywalne z wynikami uzyskanymi w procesie symulacji. Wartość ta jest znacznie mniejsza niż uzyskana w przypadku wyrobu tłoczonego na zimno.

## Wnioski

Projektowanie i wytwarzanie części powstających w wyniku procesów technologicznych formowania na gorąco jest skomplikowane, ponieważ trzeba uwzględnić czynniki techniczne związane z przeróbką plastyczną i obróbką cieplną [5]. W kompleksowym podejściu do projektowania procesu na zimno i na gorąco przydatne są programy do analizy MES. Pozwalają one na sprawdzenie technologiczności wytłoczki oraz analizę wyników symulacji metody procesu.

W pracy zestawiono dwie metody formowania – na zimno i na gorąco – które dały różne rezultaty sprężynowania. Sprężynowanie części powstającej w wyniku formowania na gorąco pozwala na osiągnięcie znacznie mniejszych wartości przemieszczenia. Jedynie kilka punktów na krawędzi części osiągnęło wartości bliskie maksymalnej tolerancji tj.  $\pm 1,5$  mm. Pomiary metodą CMM wykazały, że część formowana na zimno ma ok. 65% powierzchni poza tolerancją.

Należy uznać, że metoda formowania na gorąco minimalizuje efekt sprężynowania oraz pozwala na produkcję części o wysokiej wytrzymałości. Wymaga jednak zastosowania złożonego narzędzia i oprzyrządowania technologicznego oraz infrastruktury niezbędnej do wytworzenia części, a co za tym idzie – zwiększa czasochłonność i koszt produkcji elementów konstrukcji samochodów.

## LITERATURA

- [1] Bałon P., Świątoniowski A., Szostak J. "Improved method of springback compensation in metal forming analysis". *Strength of Materials*. 48, 4 (2016): 540–550.
- [2] Troive L., Bałon P., Świątoniowski A., Mueller T., Kielbasa B. "Springback compensation for a vehicle's steel body panel". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 31, 2 (2018): 152–163.
- [3] Bałon P., Świątoniowski A. "Springback compensation in cold forming process for high strength steel". *Archives of Metallurgy and Materials Science*. ISSN 1733-3490. 60, 4 (2015): 2471–2478.
- [4] Bałon P., Świątoniowski A., Kielbasa B., Szostak J. "Springback compensation for a vehicle's steel body panel". *Proceedings of the 20<sup>th</sup> International ESAFORM Conference of Material Forming* (2017).
- [5] Karbasian H., Tekkaya A.E. "A review on hot stamping". *Journal of Materials Processing Technology* (2010).
- [6] Erhardt R., Böke J. "Industrial application of hot forming press simulation". *1<sup>st</sup> International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel*. Kassel, Germany (2008).
- [7] Junying M., Jianping L., Jiayue L., Wenhua Bao B. "Investigation on hot forming limits of high strength steel 22MnB5". *Computational Materials Science* (2010).
- [8] Neugebauer R., Schieck F., Polster S., Mosel A., Rautenstrauch A., Schonherr J., Pierschel N. "Presshardening – An innovative and challenging technology". *Archives of civil and mechanical engineering* (2012).
- [9] Schonherr A.J., Pierschel N. "Presshardening – An innovative and challenging technology". *Archives of Civil and Mechanical Engineering* (2012).
- [10] Rong Shean L., Yi Kai L., Chien T. "Experimental and theoretical studies on formability of 22MnB5 at elevated temperatures by Gleeble simulator". *11<sup>th</sup> International Conference on Technology of Plasticity*. ICTP (2014).