

B-pillar hot stamping process with an innovative design

Proces tłoczenia na gorąco słupka B o innowacyjnej konstrukcji

IRENEUSZ WRÓBEL
PIOTR DANIELCZYK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2024.7.13>

The article describes the hot stamping process of the B-pillar of a passenger car from laser-welded blanks with a patch. The results of the stamping simulation performed in the Autoform package are presented and the stamping die is described. A specially designed welding station was used to prepare the blanks. A test series of 300 stampings was made. Basic mechanical properties of drawpieces (yield strength $R_{p0.2}$, strength limit R_m and hardness HV) were checked and a three-point bending test was performed. **KEYWORDS:** hot stamping, Usibor 1500, Usibor 2000, Ductibor 500 laser welding of blanks, three-point bending test

W artykule opisano proces tłoczenia na gorąco słupka B samochodu osobowego z dwóch formatek spawanych laserowo z dodatkową nakładką. Przedstawiono wyniki symulacji tłoczenia wykonanej w pakiecie oprogramowania Autoform oraz konstrukcję tłoczni. Do przygotowania formatek zaprojektowano specjalne stanowisko spawalnicze. Wykonano próbną serię 300 wytłoczek. Sprawdzono ich podstawowe własności mechaniczne (granice plastyczności $R_{p0.2}$, granice wytrzymałości R_m oraz twardość HV), a także przeprowadzono test trójpunktowego zginania. **SŁOWA KLUCZOWE:** tłoczenie na gorąco, Usibor 1500, Usibor 2000, Ductibor 500, spawanie laserowe formatek, zginanie trójpunktowe

Wprowadzenie

Produkcja części wchodzących w skład struktur nośnych nadwozi współczesnych samochodów wymaga stosowania nowych materiałów konstrukcyjnych i technologii ich wytwarzania. Jest to związane z wyzwaniami wynikającymi wprost z polityki zrównoważonego rozwoju [1], a dotyczy przede wszystkim redukcji emisji CO_2 [2]. Z tego powodu dąży się m.in. do zmniejszenia masy nadwozi samochodów osobowych, przy spełnieniu wszystkich norm bezpieczeństwa [3].

Już od kilkunastu lat coraz więcej elementów nadwozi nowych modeli samochodów wytwarza się w technologii tłoczenia na gorąco, ze stali manganowo-borowych [4]. Po procesie tłoczenia na gorąco materiał może osiągnąć wytrzymałość na rozciąganie sięgającą 1900 MPa [5], co stanowi zupełnie nową jakość w produkcji wysoko wytrzymałych wytłoczek. Ponadto technologia ta pozwala na wyprodukowanie wytłoczek o zmiennych parametrach mechanicznych. Jednym ze sposobów na uzyskanie takiej części jest wykorzystanie do tłoczenia formatki spawanej lase-

rem, wykonanej z różnych gatunków stali [6, 7], często z dodatkową nakładką (*patch*).

Przykładem części, którą wykonuje się z różnych materiałów, jest słupek B samochodu osobowego (rys. 1a). W prezentowanej pracy przedstawiono proces produkcji takiej wytłoczki wykonanej z trzech rodzajów stali (tabl. I) do tłoczenia na gorąco: główna formatka była spawana ze stali Usibor 2000 i Usibor 1500 oraz nakładka była wykonana ze stali Ductibor 500 (rys. 1b). W procesie założono połączenie formatek spoiną doczołową, a nakładki spoiną otworową. Wylimitowanie zazwyczaj stosowanego zgrzewania oporowego nakładki do formatki na rzecz spawania laserowego spoinami otworowymi w istotny sposób obniży energochłonność i koszty procesu (zgrzewanie wymaga odrębnego stanowiska).

TABLE I. Mechanical properties of Usibor 1500, Usibor 2000 and Ductibor 500 steels in the hardened state

TABLICA I. Właściwości mechaniczne stali Usibor 1500, Usibor 2000 oraz Ductibor 500 w stanie zahartowanym

Nazwa handlowa stali	Granica plastyczności $R_{p0.2}$ [MPa]	Granica wytrzymałości R_m [MPa]	Twardość HV
Usibor 1500	> 1050	> 1400	> 400
Usibor 2000	> 1400	> 1800	> 550
Ductibor 500	> 330	> 550	> 250

W artykule opisano sposób przygotowania formatki spawanej i symulację procesu tłoczenia oraz przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych wykonanych na gotowych wytłoczkach. Praca jest kontynuacją działań opisanych w [8], mających na celu ocenę możliwości technicznych laserowego spawania płaskich formatek wykonanych z różnych gatunków stali do tłoczenia na gorąco.

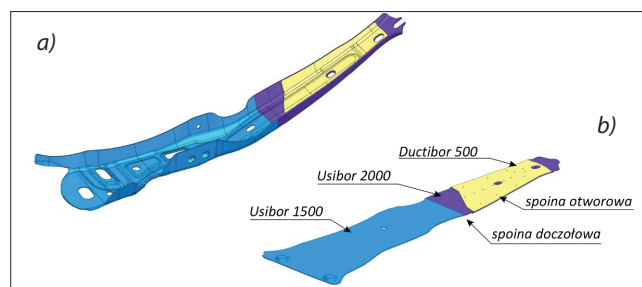


Fig. 1. Drawpieces for intended use: a) finished product (after trimming), b) welded form

Rys. 1. Wytłoczka o zmiennych właściwościach mechanicznych: a) gotowy wyrób (po okrawaniu), b) formatka spawana

* Dr hab. inż. Ireneusz Wróbel, prof. UBB – iwrobel@ubb.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-7587-0217> – Uniwersytet Bielsko-Bialski; Polmotors sp. z o.o., Bielsko-Biała, Polska
Dr inż. Piotr Danielczyk – pdanielczyk@ath.bielsko.pl, <https://orcid.org/0000-0002-7622-3150> – Uniwersytet Bielsko-Bialski; Polmotors sp. z o.o., Bielsko-Biała, Polska

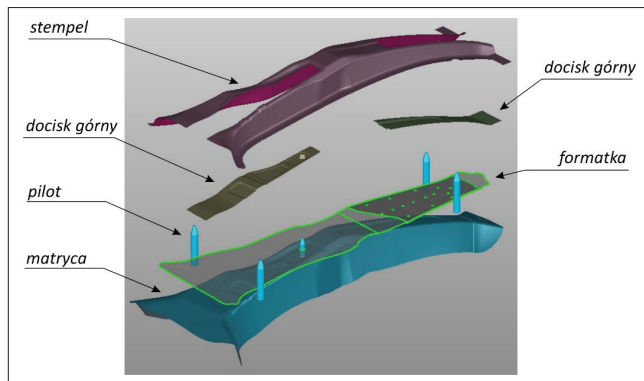


Fig. 2. Working surfaces of tools
Rys. 2. Powierzchnie robocze narzędzi

Symulacja procesu tłoczenia. Konstrukcja tłoczni

Symulację procesu tłoczenia słupek *B* z materiałów łączonych z nakładką przeprowadzono z użyciem oprogramowania Autoform 10. Do wykonania symulacji procesu przygotowano modele CAD narzędzi. W tym celu, na bazie modelu 3D wytłoczki, pozyskano powierzchnie robocze matrycy, docisków i stempli, tak jak pokazano na rys. 2.

W symulacji procesu chłodzenia narzędzia uwzględniono rozkład kanałów chłodzących powierzchnie robocze narzędzi. Ponieważ w rzeczywistym narzędziu kanały chłodzące są wiercone w poszczególnych sekcjach narzędzia, do programu zaimportowano linie środkowe planowanych kanałów chłodzących i przypisano im odpowiednie średnice (rys. 3).

Przedstawione modele geometryczne uzupełniono o własności materiału wytłoczki. Zdefiniowano współczynnik przejmowania ciepła od narzędzia do czynnika chłodzącego (wody) oraz temperaturę samego chłodziwa. Ponadto uwzględniono w symulacjach zależność współczynnika przewodzenia z formatki do narzędzi od nacisku prasy. Maksymalną wartość

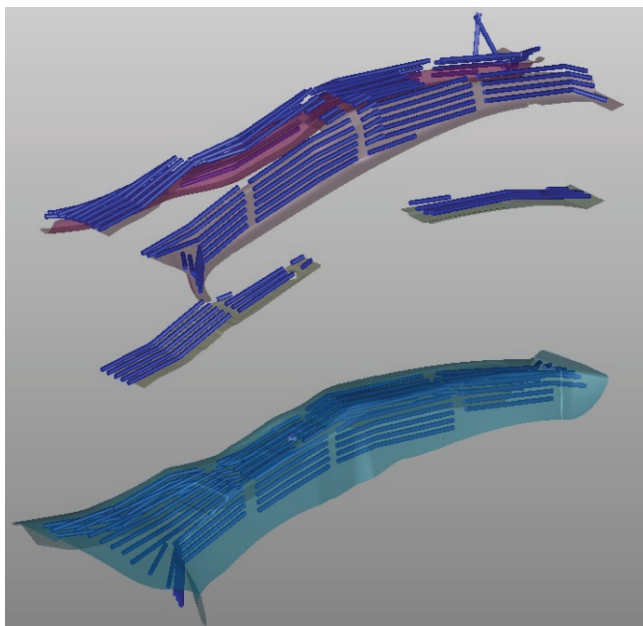


Fig. 3. Arrangement of cooling channels in the tool
Rys. 3. Rozkład kanałów chłodzących narzędziu

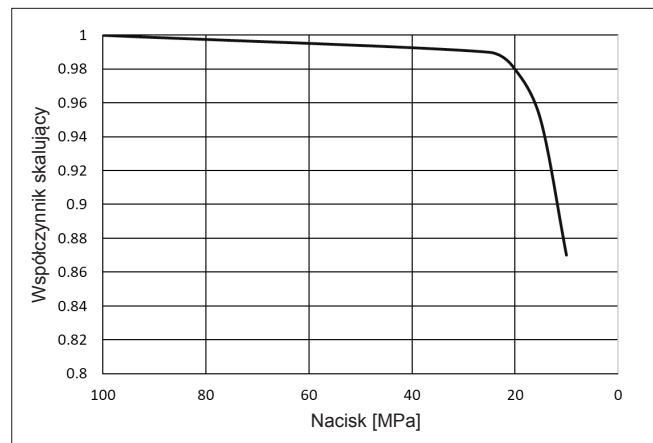


Fig. 4. Scaling factor
Rys. 4. Współczynnik skalujący

tego współczynnika przyjęto równą $3,5 \text{ mW/mm}^2\text{K}$. Wartość ta jest przyjmowana dla nacisku narzędzi równego 100 MPa . Dla mniejszych nacisków wartość tę koryguje się za pomocą współczynnika skalującego (rys. 4), którego zmienność określa dostawca blachy do tłoczenia.

W przypadku analizowanego procesu przyjęto wstępnie, zgodnie z założeniami konstrukcyjnymi, a także na podstawie doświadczenia konstruktorów tego typu narzędzi i wskazówek producenta blach:

- początkową temperaturę formatki równą 810°C ,
- współczynnik przenikania ciepła od narzędzia do czynnika chłodzącego o wartości $15 \text{ mW/mm}^2\text{K}$,
- temperaturę czynnika chłodzącego równą 20°C .

Symulację nagrzewania i chłodzenia narzędzia przeprowadza się iteracyjnie. Jako kryterium zbieżności procesu obliczeniowego przyjmuje się stan, przy którym różnice temperatury narzędzia w kolejnych iteracjach nie będą przekraczały 2°C . W analizowanym przypadku trzeba było wykonać cztery pełne cykle pracy z włączoną opcją Quick Numerical Cycling. Metoda ta pozwala na znaczące skrócenie liczby cykli niezbędnych do ustabilizowania się temperatury wytłoczki i narzędzia. Zamiast rozpoczynać analizę od temperatury otoczenia dla narzędzia, dla pierwszego cyklu szacowana jest ich temperatura początkowa, co korzystnie wpływa na efektywność całej analizy.

Z przeprowadzonych obliczeń uzyskano wyniki opisujące przebieg procesu tłoczenia. W pierwszej kolejności poddano analizie FLD (Forming Limit Diagram).

Wyniki przedstawione na rys. 5 wskazują, że wyrób został wykonany. Nie zaobserwowano miejsc zagrożonych ryzykiem wystąpienia pęknięć. Wielkości pocięń (rys. 6) nie przekraczają 17% , co w odniesieniu do wartości granicznej 18% jest wartością bezpieczną.

Warto dodać, że w gotowej wytłoczce prognozowany rozkład martenzytu obejmuje 100% jej objętości, co gwarantuje uzyskanie wyrobu o odpowiedniej twardości i pożądanych własnościach wytrzymałościowych.

Na podstawie wyników symulacji konstruktorzy wykonali model 3D tłoczni (rys. 7–8). Jest to dwugniazdowy tłocznik, którego zasadnicze elementy to płyta dolna (uzębrowany odlew żeliwny) wraz z matrycą oraz płyta górna z dociskiem górnym i stemplami

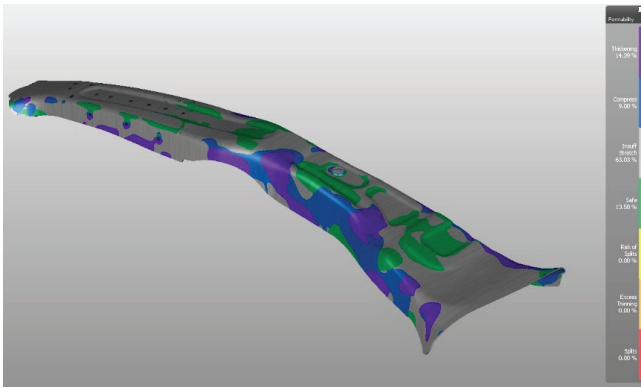


Fig. 5. Formability zones on the finished product
Rys. 5. Strefy formowalności na gotowym wyrobie

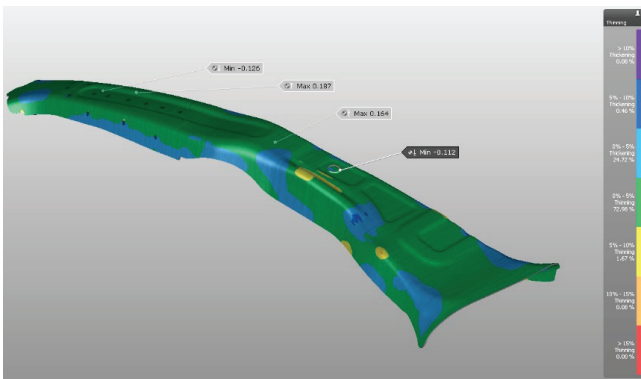


Fig. 6. Sizes of thinning (swelling)
Rys. 6. Wielkości pocienień (spęczeń)

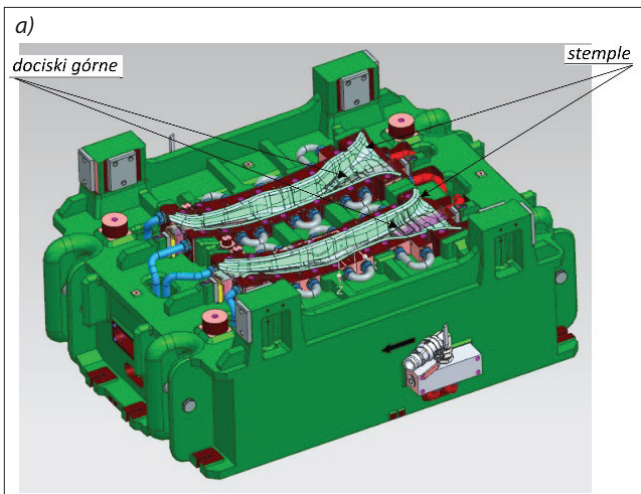


Fig. 7. Stamping tool – upper part: a) 3D model, b) implementation
Rys. 7. Tłocznik – część górna: a) model 3D, b) realizacja

formującymi. Układ chłodzenia narzędzi jest zasilany z dwóch rozdzielaczy, które charakteryzują się całkowitym objętościowym natężeniem przepływu na poziomie 150 l/min. Poszczególne sekcje są połączone za pomocą rur, tak aby umożliwić przepływ czynnika chłodzącego pomiędzy sekcjami.

W dolnej części narzędzia widoczne jest wybranie w matrycy pod nakładkę.

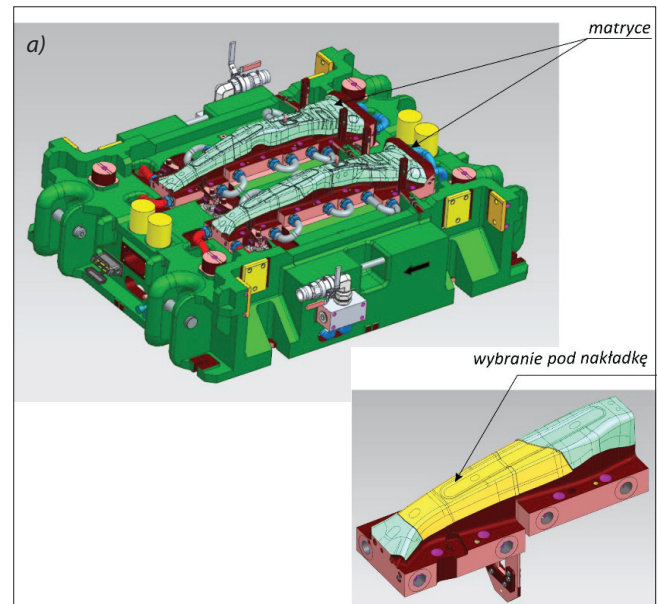


Fig. 8. Stamping tool – lower part: a) 3D model, b) implementation
Rys. 8. Tłocznik – część dolna: a) model 3D, b) realizacja

Przygotowanie formatek do tłoczenia. Próbna seria wytłoczek

Proces przygotowania formatek do tłoczenia przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszej kolejności wycięto z blach formatki przeznaczone do spawania (rys. 9). Następnie formatki te zostały ułożone w specjalnym przyrządzie spawalniczym (rys. 10).

Przyrząd został tak zaprojektowany, aby umożliwić redukcję szczeliny pomiędzy formatkami spawanymi doczołowo do najmniejszej możliwej wartości. Realizuje to serwonapęd poruszający jednym z elementów przeznaczonych do spawania. Wielkość szczeliny między spawanymi formatkami nie zawsze jest taka sama. Na podstawie badań przeprowadzonych w pracy [9] stwierdzono, że może się ona zmieniać w granicach $0,10 \pm 0,24$ mm. Jest to spowodowane zmieniającą się w czasie, wskutek zużycia matryc i stempli tnących,

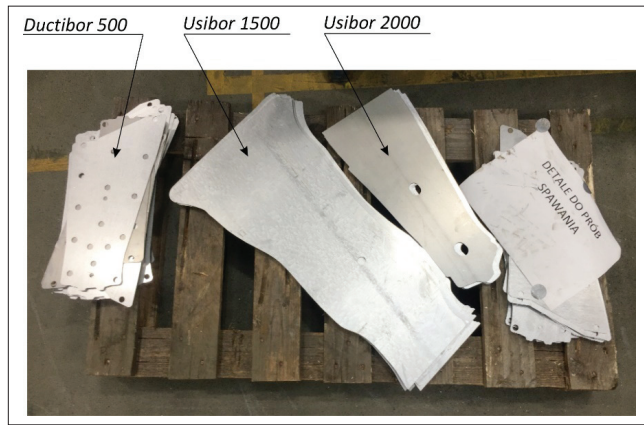


Fig. 9. Semi-finished products prepared for welding
Rys. 9. Półprodukty przygotowane do spawania



Fig. 10. Welding device
Rys. 10. Przyrząd spawalniczy

jakością krawędzi formatek składowych. Dlatego właśnie stanowisko zostało wyposażone w system wizyjny do pomiaru wielkości szczeliny. Na podstawie wyniku tego pomiaru do lasera przesyłana jest informacja, z których nastaw procesu skorzystać. Najlepsze wartości nastaw, zwłaszcza posuw oraz położenie ogniska lasera, uzyskane w wyniku wielu testów opisanych szczegółowo w [8], zawiera tabl. II.

TABLE II. Table of welding process settings depending on the size of the gap between the pieces
TABLICA II. Tabela nastaw procesu spawania w zależności od wielkości szczeliny między formatkami

Numer wystawy	Wielkość szczeliny s [mm]	Posuw v [m/min]	Położenie ogniska f [mm]
1	0,1	8	-1
2	0,12	7	-2
3	0,14	6	-2
4	0,16	5	-3
5	0,18	5	-4
6	0,20	4	-5

Podobnie na podstawie wielu prób dobrano optymalne parametry spawania dla spoin otworowych łączących nakładkę z formatką: moc lasera $P=3$ kW, wielkość otworu $d=6,8$ mm, posuw $v=14$ m/min, ogniskowa $f=-2$ mm. Przy tych parametrach własności mechaniczne spoiny otworowej uzyskują zbliżone wartości jak dla połączenia zgrzewanego w stanie surowym i zahartowanym.

Na rys. 11 pokazano przykładowe spoiny (doczołową i otworowe) uzyskane podczas spawania formatek z uprzednio określonymi nastawami źródła spawalniczego.

Z tak przygotowanych formatek z nakładką na zrobotyzowanej linii do tłoczenia na gorąco (rys. 12) wykonano testową partię 300 sztuk wytłoczek słupka B (rys. 13).

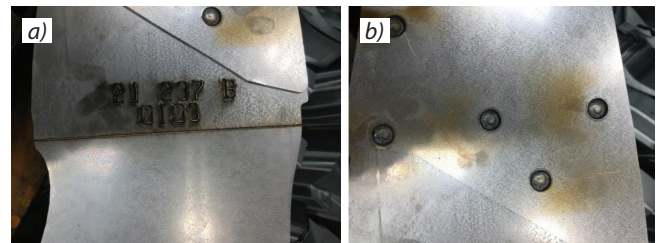


Fig. 11. Welds on the blanks: a) butt, b) hole welds
Rys. 11. Spoiny na formatce, a) doczołowa, b) otworowe



Fig. 12. Hot stamping process: a) form in the stamping die, b) ready-made stampings on the stamping die
Rys. 12. Proces tłoczenia na gorąco, a) formatka w tłoczniku, b) gotowe wytłoczki na tłoczniku



Fig. 13. Ready-made drawpieces
Rys. 13. Gotowe wytłoczki

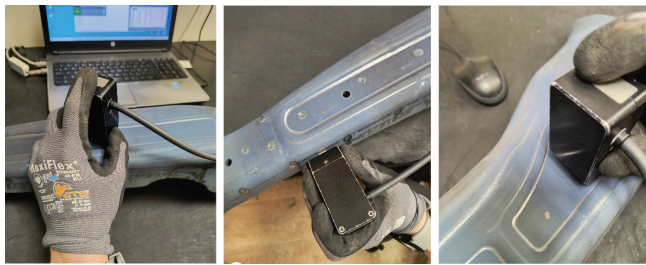


Fig. 14. Measurement of the mechanical parameters of the drawpieces
Rys. 14. Pomiar parametrów mechanicznych wytłoczki

Ocena własności mechanicznych wytłoczki

W celu skontrolowania parametrów mechanicznych wyprodukowanych wytłoczek ($R_p0.2$, R_m i HV) przeprowadzono badania nieniszczące za pomocą urządzenia 3MA (Micromagnetic Multiparameter Microstructure and Stress Analysis) produkcji Fraunhofer Institute. Składa się ono z głowicy pomiarowej oraz modułu do analizy sygnału pochodzącego z głowicy połączonego z komputerem. System ten analizuje właściwości magnetyczne stali i na tej podstawie wyznacza parametry mechaniczne. Przed pomiarem czujnik jest skalibrowany do pomiaru parametrów konkretnego gatunku stali. Pomiar polega na dotknięciu głowicą pomiarową do powierzchni mierzonej wytłoczki, tak jak pokazano na rys. 14.

Dla każdej strefy wytłoczki wykonano serię 10 prób, a przykładowe wyniki – uzyskane dla jednej z wytłoczek – przedstawiono w tabl. III.

Analizując wyniki pomiarów, stwierdzono, że wytłoczki spełniają wszystkie wymagania wytrzymałościowe zapisane z tabl. I. Zarówno twardość, jak i własności wytrzymałościowe w każdym z punktów pomiarowych są wyższe od wymaganych.

Próba trójpunktowego zginania

Test trójpunktowego zginania przeprowadzono, by sprawdzić, czy zniszczenie analizowanej belki nastąpi w materiale rodzimym, czy też w miejscu, w którym znajduje się spoina. Ponadto istotne było pozyskanie informacji o wartości siły potrzebnej do trwałego

uszkodzenia wytłoczki (za takie uznaje się pojawienie się pierwszego pęknięcia). Dla omawianej wytłoczki powinna być ona większa od 11 kN.

Próbie wykonano na specjalnie skonstruowanym stanowisku (rys. 15). Podczas takiego testu badaną belkę umieszcza się w dedykowanych uchwytach. Sposób zamocowania belki oraz warunki przeprowadzenia testu (prędkość i skok stempla) są określane przez odbiorcę wytłoczek. Po zamocowaniu belki za pomocą czujnika laserowego sprawdza się i ewentualnie

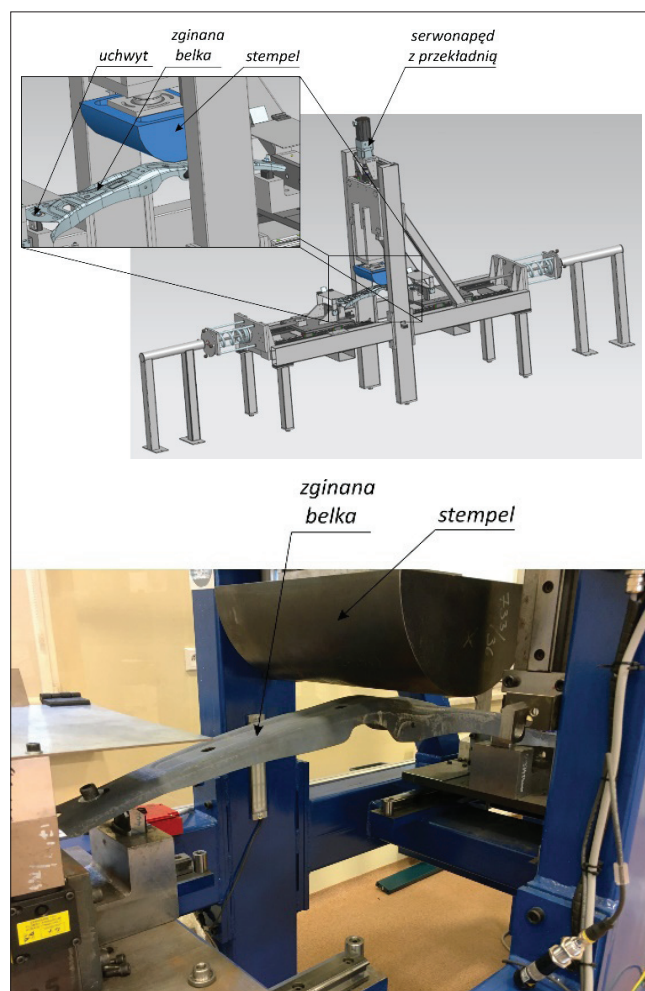


Fig. 15. Three-point bending device – design and implementation
Rys. 15. Urządzenie do trójpunktowego zginania – projekt i realizacja

TABLE III. Results of non-destructive measurements of a sample extrusion
TABLICA III. Wyniki pomiarów nieniszczących przykładowej wytłoczki

Punkt pomiarowy	Usibor 1500			Usibor 2000			MBW600		
	HV	$R_p0.2$ [MPa]	R_m [MPa]	HV	$R_p0.2$ [MPa]	R_m [MPa]	HV	$R_p0.2$ [MPa]	R_m [MPa]
1	405	1167	1512	628	1408	1861	223	453	669
2	401	1134	1467	590	1409	1916	225	452	675
3	414	1178	1499	602	1435	1913	237	452	665
4	409	1172	1472	618	1422	1949	238	468	663
5	416	1132	1506	606	1433	1932	224	449	682
6	430	1142	1493	611	1426	1953	236	449	654
7	406	1119	1508	592	1422	1971	233	462	684
8	402	1123	1470	595	1406	1979	228	458	658
9	424	1113	1493	615	1429	1896	223	457	686
10	418	1195	1485	625	1411	1943	234	442	651

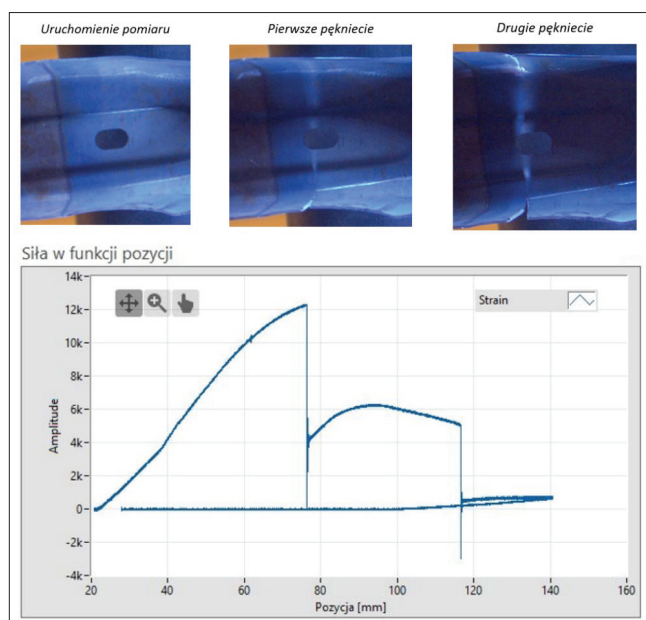


Fig. 16. Three-point bending test result
Rys. 16. Wynik testu trójpunktowego zginania

koryguje jej położenie względem stempla zginającego. Włączenie posuwu suwaka ze stemplem za pomocą serwonapędu rozpoczyna procedurę pomiarową. Od chwili kontaktu stempla z wytłoczką system zbiera sygnały z czujników siły oraz silnika i enkodera, a za pomocą kamer zapisywane są filmy z pomiaru. Po osiągnięciu wymaganego skoku stempel powraca do pozycji początkowej.

Testom poddano 30 wybranych wytłoczek z próbnej serii produkcyjnej. Najistotniejszym wynikiem uzyskanym podczas próby trójpunktowego zginania jest wykres obrazujący zmianę siły oddziaływania stempla w funkcji jego przemieszczenia. Przedstawiony na rys. 16 wykres dla jednej przykładowej wytłoczki pozwala na odczyt maksymalnej wartości siły, przy której pojawiło się pierwsze pęknięcie. Wynosi ona nieco ponad 12 kN, przy czym – jak można zauważyć na dołączonych fotografiach – pęknięcie wystąpiło w materiale rodzimym, poza rejonem spoiny doczołowej. Należy dodać, że wszystkie przebadane belki pękały w podobny sposób, a wartość siły niszczącej belkę w każdym przypadku przekraczała wymagane 11 kN.

Wnioski

W wyniku prowadzonych prac wyprodukowano próbną serię 300 wytłoczek słupka B wykonanego z trzech rodzajów stali: Usibor 1500, Usibor 2000 oraz Ductibor 500. Pokazano, że możliwe jest wykonanie spawanej formatki z dwóch rodzajów blachy przeznaczonej do tłoczenia na gorąco z dodatkową nakładką i wykorzystanie jej do produkcji wysoko wytrzymałych wytłoczek o zróżnicowanych pod względem parametrów mechanicznych strefach. Stwierdzono, że wyrób spełnia wszystkie wymagania wytrzymałościowe oraz pozytywnie przeszedł test trójpunktowego zginania. Opracowanie technologii produkcji części samochodowych z formatek spawanych laserowo

w połączeniu z produkcją wytłoczek ze strefami miękkimi [10] daje duże możliwości kształtowania parametrów wytrzymałościowych części karoseryjnych odpowiedzialnych za bezpieczeństwo bierne pojazdów. Prezentowane rozwiązanie to przykład realizujący współczesną koncepcję projektowania karoserii samochodowych: *zastosuj materiał o wymaganych parametrach we właściwych miejscach*.

Badania realizowano przy finansowaniu w ramach RPO WSL 2014-2020 Oś priorytetowa I. Nowoczesna gospodarka Działanie 1.2. Badania, rozwój i innowacje w przedsiębiorstwach w ramach projektu: „Prace rozwojowe nad innowacyjnym słupkiem B o 3 zróżnicowanych pod względem parametrów mechanicznych strefach, z zastosowaniem nowych rodzajów stali oraz udoskonalonej technologii spawania laserowego TWB”.

LITERATURA

- [1] *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future* (1987), [https://www.google.com/search?q = Our+common+future+by+World+Commission+on+Environment+and+Development&oq = Our+common+future+by+World+Commission+on+Environment+and+Development&gs_lcrp = EgZjaHJvbwUyDggAEEUYExg5GOMCGIAEMgkIARAUgBMYGaQyCggCEAAAYExgWGB4yCggDEAAAYExgWGB4yCggEEAAAYExgWGB4yCggFEAAAYExgWGB7SAQwxODA5ODk1ajBqMTWoAgCwAgA&sourceid = chrome&ie = UTF-8](https://www.google.com/search?q=Our+common+future+by+World+Commission+on+Environment+and+Development&oq=Our+common+future+by+World+Commission+on+Environment+and+Development&gs_lcrp=EgZjaHJvbwUyDggAEEUYExg5GOMCGIAEMgkIARAUgBMYGaQyCggCEAAAYExgWGB4yCggDEAAAYExgWGB4yCggEEAAAYExgWGB4yCggFEAAAYExgWGB7SAQwxODA5ODk1ajBqMTWoAgCwAgA&sourceid=chrome&ie=UTF-8), (dostęp: maj 2024).
- [2] Directive (EU) 2019/1161 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 amending Directive 2009/33/EC on the promotion of clean and energy-efficient road transport vehicles. PE/57/2019/REV/2, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/1161/oj>.
- [3] Miyaniishi M. "Manufacturing of Light Weight Cars". *Proceedings of the 13th International Conference on Metal Forming. Toyohashi, Japan (19–22 September 2010)*. *Steel Research International*. 81, 9 (2010): 1–8, https://www.researchgate.net/publication/295371332_Manufacturing_of_Light_Weight_Cars.
- [4] Turetta A., Bruschi S., Ghiotti A. "Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations". *Journal of Materials Processing Technology*. 177 (2006): 396–400, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.041>.
- [5] Zhu L., Gu Z., Xu H., Lu Y., Chao J. "Modeling of microstructure evolution in 22MnB5 steel during hot stamping". *Journal of Iron and Steel Research International*. 21 (2014): 197–201, [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(14\)60030-3](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(14)60030-3).
- [6] Chengxi L., Zhongwen X., Weili X., Zhenjun H., Debin S. "Hot stamping of patchwork blanks: modelling and experimental investigation". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 92, 15 (2017): 2609–2617, <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0351-9>.
- [7] Merklein M., Johannes M., Lechner M., Kuppert A. "A review on tailored blanks – production, applications and evaluation". *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 2 (2014): 151–164, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.08.015>.
- [8] Danielczyk P., Wróbel I. „Laser welding of hot stamping blanks. Laserowe spawanie formatek do tłoczenia na gorąco”. *Mechanik*. 4(2023): 37–41, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2023.4.9>.
- [9] Serwin K. „Weryfikacja badawcza stosowanej technologii spawania kompletującego wytypowanej części. Praca dyplomowa magisterska”. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielski Białej, Bielsko-Biała 2019.
- [10] Wróbel I. „Symulacje inżynierskie w projektowaniu procesu produkcji wytłoczek ze strefami miękkimi”. *Komputerowe wspomaganie projektowania, wytwarzania i eksploatacji*. Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna (2020): 281–289. ■