

Spawanie formatek o zmiennych parametrach mechanicznych

dr hab. inż. Ireneusz Wróbel, (iwrobel@polmotors.com.pl) Polmotors sp. z o.o. Dział Badań i Rozwoju

dr inż. Piotr Danielczyk, (pdanielczyk@polmotors.com.pl) Polmotors sp. z o.o. Dział Badań i Rozwoju

Streszczenie

W artykule przedstawiono próby technologiczne laserowego spawania płaskich formatek o tej samej grubości, z dwóch rodzajów stali do tłoczenia na gorąco. Opracowano i wykonano specjalne oprzyrządowanie do spawania formatek. Przeprowadzono testy laserowego spawania formatek o grubości 2 mm z dwóch rodzajów stali Usibor 1500 i Usibor 2000 z różnymi parametrami. Z zespawanych formatek wycięto próbki wioselkowe do badań wytrzymałościowych. Wykonano badania uzyskanej mikrostruktury oraz badania twardości. Omówiono wyniki badań.

Summary

The article presents technological tests of laser welding of flat blanks of the same thickness, made of two types of hot-stamping steel. Special equipment for welding blanks was developed and manufactured. Tests of laser welding of 2 mm thick blanks of two types of Usibor 1500 and Usibor 2000 steel with different parameters were carried out. Rowing samples for strength tests were cut out of the welded blanks. The obtained microstructure and hardness tests were performed. The research results were discussed.

Słowa kluczowe: tłoczenie na gorąco, 22mnB5, 37MnB5, Usibor 1500, Usibor 2000, spawanie laserowe, hartowanie

Keywords: hot stamping, 22mnB5, 37MnB5, Usibor 1500, Usibor 2000, laser welding, hardening

1. Wstęp

Wymagania związane z ochroną środowiska [1,2] wymusiły na konstruktorach karoserii samochodów osobowych zastosowania nowych materiałów konstrukcyjnych i nowych technologii ich wytwarzania. Karoserie każdego z nowych modeli popularnych marek samochodów są lżejsze od poprzednich o przynajmniej 20% [3]. Trend ten uległ jeszcze większemu nasileniu w przypadku konstrukcji karoserii samochodów eklektycznych, w których należy zrównoważyć wagę bardzo ciężkiego akumulatora. Jedną z technologii, która umożliwia produkcję podzespołów karoserii o bardzo wysokich właściwościach mechanicznych i jednocześnie o niskiej masie jest technologia tłoczenia na gorąco. Do tego celu wykorzystuje się specjalną stal do tłoczenia na gorąco 22MnB5 (Usibor 1500) oraz stosunkowo nowy gatunek stali 37MnB5 (Usibor 2000). W tabeli 1 podano wartości parametrów mechanicznych obu stali po procesie tłoczenia i hartowania.

Tabela 1 Właściwości mechaniczne stali Usibor 1500 i Usibor 2000 [4].

Nazwa stali	Granica plastyczności Rp0,1 MPA	Granica wytrzymałości Rm MPa	Wydłużenie A ₅₀ %
Usibor 1500	>1050	>1400	6
Usibor 2000	>1400	>1800	7

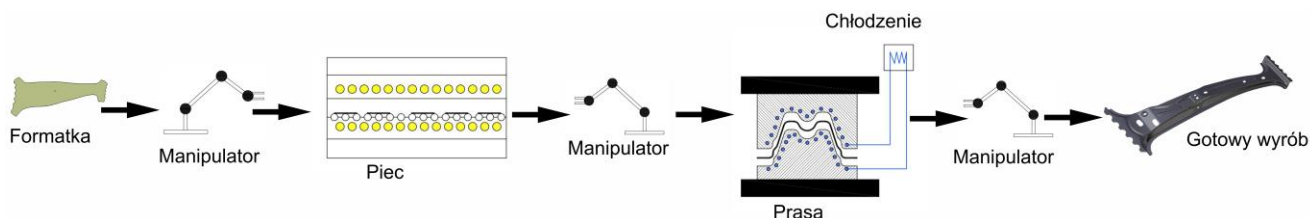
W tabeli 2 przedstawiono skład chemiczny tych stali.

Tabela 2 Skład chemiczny stali Usibor 1500 i Usibor 2000 [4].

	C %	Mn %	Si %	B %
Usibor 1500	0.25	1.4	0.4	0.005
Usibor 2000	0.36	0.8	0.8	0.005

Proces technologiczny tłoczenia na gorąco (ang. hot forming, press hardening) polega na kształtowaniu płaskiej, nagrzanej do temperatury austenizacji (ok. 930 °C) formatki i hartowaniu tej wyłoczki pomiędzy zamkniętą i dociśniętą z pełną mocą prasy hydraulicznej matrycą i stemplem (rys. 1).





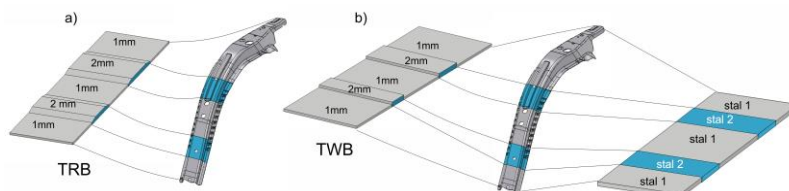
Rys. 1 Proces technologiczny tłoczenia na gorąco

Stal ze struktury ferrytyczno-perlitycznej przemienia się w strukturę martenzytyczną. Aby zaszła przemiana martenzytyczna konieczna jest duża prędkość chłodzenia wynosząca co najmniej $27 \text{ }^\circ\text{K/s}$ [5, 6] dlatego do tego procesu stosuje się tłoczniaki o specjalnej konstrukcji, chłodzone wodą. Dzięki temu uzyskuje się wytłoczki karoseryjne o bardzo wysokich właściwościach mechanicznych: granicy plastyczności $R_e=1050\text{-}1400 \text{ MPa}$, granicy wytrzymałości $R_m=1400\text{-}1800 \text{ MPa}$ i twardości równej $450\text{-}500 \text{ HV}$.

Części karoseryjne produkowane metodą tłoczenia na gorąco mają znacznie mniejszą masę, przy zachowaniu wysokich parametrów wytrzymałościowych [7,8]. Bardzo dużą zaletą technologii tłoczenia na gorąco jest brak efektu sprężynowania powrotnego, czyli niekontrolowanego odkształcania się wytłoczek tłoczonych w temperaturze pokojowej ze stali o wysokich parametrach wytrzymałościowych.

Metoda tłoczenia na gorąco pozwala produkować wytłoczki, w których można wyodrębnić obszary o różnych parametrach mechanicznych. Dzięki temu konstruktorzy karoserii mogą projektować specjalne strefy zgniotu lub miejsca, w których projektowana wytłoczka ulegnie deformacji (np. podczas wypadku). W ten sposób nowo projektowane karoserie samochodów spełniają wyższe wymagania bezpieczeństwa. Jest kilka metod uzyskania wytłoczki o określonych (zmiennych) parametrach mechanicznych, jedną z nich jest zastosowanie formatki o zmiennej grubości lub formatki wykonanej z różnych gatunków stali [9, 10]. Takie zmienne właściwości formatki można uzyskać na dwa sposoby:

- a) Zastosowanie taśmy blachy z jednego gatunku stali, ze zmienną grubością wydłuż jej szerokości. Jest ona dostarczana przez hutę i jest walcowana tak aby uzyskać odpowiednią grubość blachy w odpowiednim rejonie taśmy (z ang. Tailored Rolled Blank - TRB), rys. 2a).
- b) Zastosowanie dwóch lub więcej taśm o różnej grubości lub wykorzystanie stali o różnych właściwościach mechanicznych ale o tej samej grubości. Taśmy te są spawane ze sobą laserowo i w ten sposób uzyskuje się jedną taśmę o zmiennych parametrach (ang. tailored welded blank TWB), rys. 2 b).



Rys. 2. Wytłoczki o zmiennych właściwościach mechanicznych

Dla dużych serii produkcyjnych, spawanie laserowe pasów blach można zlecić wyspecjalizowanej firmie. Dla małych serii produkcyjnych (w szczególności podczas jednostkowej produkcji wytłoczek do karoserii samochodów klasy premium) spawanie laserowe formatek wykonywane jest w firmie produkującej wytłoczki. W referacie zaprezentowano wyniki wstępnych badań nad technologią spawania laserowego płaskich formatek. Celem prezentowanych prac było dobranie parametrów spawania, tak aby uzyskać spoinę odpowiedniej jakości i wytrzymałości mechanicznej. Aby zrealizować cel przeprowadzono testy laserowego spawania formatek o grubości 2 mm z dwóch rodzajów stali Usibor 1500 i Usibor 2000. Poprawność uzyskanych wyników była potwierdzona testami wytrzymałościowymi.

2. Dobór parametrów technologicznych do laserowego spawania formatek

Do badań nad doбором optymalnych parametrów spawania laserowego formatek wykorzystano maszynę TRUPMF TRU DISK CELL 7040 (rys. 3). Służy ona przede wszystkim do obcinania wytłoczek produkowanych metodą do tłoczenia na gorąco. Posiada też specjalne programy sterujące maszyną przystosowane do małoseryjnego spawania płaskich formatek.



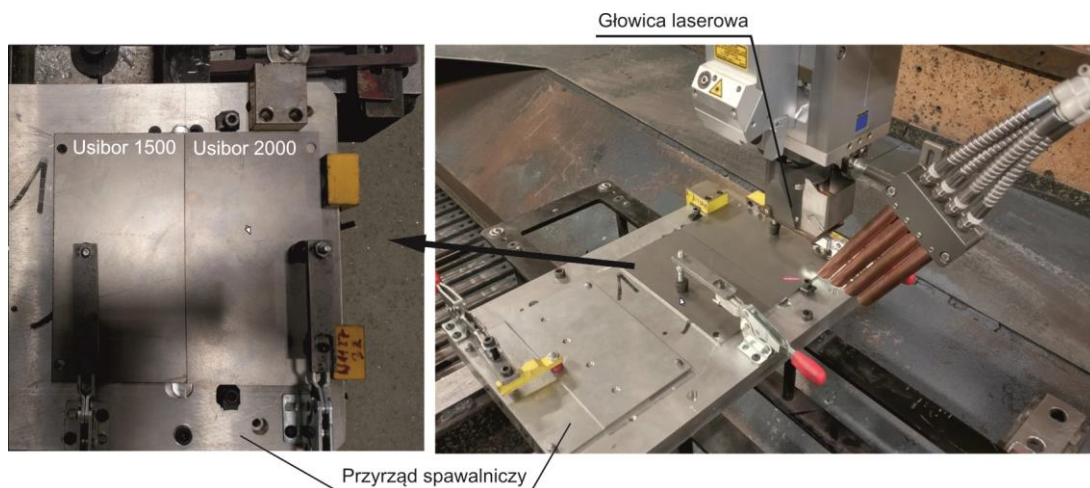
Rys. 3 Maszyna TRUPMF TRU DISK CELL 7040

Na podstawie analizy literatury oraz doświadczenia inżynierów zajmujących się spawaniem laserowym podzespołów karoseryjnych wyodrębniono następujące parametry spawania laserowego mające znaczący wpływ na jakość spoin: moc wiązki laserowej, położenie ogniska, prędkość spawania, szerokość szczeliny między formatkami. Parametry te mogły zmieniać swoją wartość w zakresie:

- moc lasera (1.6 – 3 kW)
- średnica plamki (100÷500 μm)
- prędkość spawania (4÷8 m/min)
- szerokość szczeliny (0÷0,2 mm)

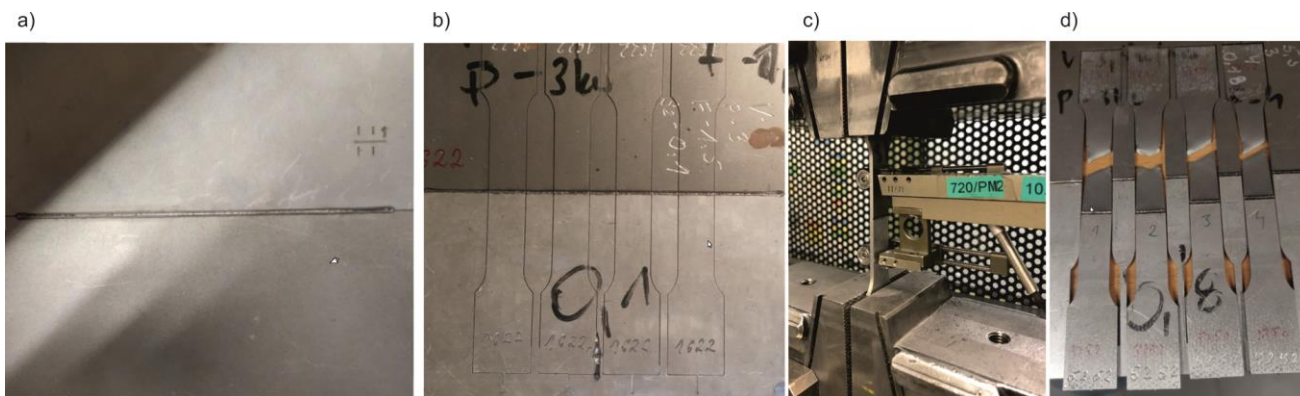
Parametrem stałym było natężenie przepływu gazu ochronnego wynoszące 20l/min. Ognisko lasera było dobierane automatycznie przez system sterujący maszyną.

Jakość spoin została zbadana na podstawie norm PN-EN ISO 13919-1:2002, PN-EN ISO 5173:2010, PN-EN ISO 4136:2013-05 oraz na podstawie norm branżowych firm motoryzacyjnych takich jak Audi, BMW i Volvo. Badanie polegało na zespawaniu dwóch płaskich formatek o kształcie prostokąta o wymiarach 350mmx250 mm o grubości 2mm. Jedna formatka wykonana była ze stali Usibor 1500 a druga ze stali Usibor 2000. Na rysunku 4 przedstawiono formatki umieszczone w specjalnym przyrządzie przed spawaniem.



Rys. 4 Formatki przed spawaniem umieszczone w przyrządzie spawalniczym

Przed przystąpieniem do spawania przeprowadzono procedurę kalibracyjną maszyny TLC7040 w ramach, której wykonano korekcję położenia osi Z głowicy, korekcję ogniskowej soczewki oraz centrowanie promienia lasera. Opracowano specjalny program badawczy do oceny wpływu wybranych parametrów na jakość spoiny. Łącznie zespawano kilkadziesiąt próbek. Po każdej próbie oceniano wielkość przetopu, obserwowano lico spoiny oraz sprawdzano czy nie pojawiły się pęknięcia i pęcherze. W rezultacie uzyskano wartości parametrów technologicznych spawania laserowego dla których jakość spoin była najlepsza i zgodna z wymaganiami określonymi w normach branżowych koncernów motoryzacyjnych. Uzyskano spoiny których przetop był na całej długości spoiny, bez widocznych pęknięć ani pęcherzy na powierzchni spoiny. Z zespawanych formatek wycinano próbki wiosełkowe i rozciągano je na maszynie wytrzymałościowej tak, jak to przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5 a) Formatki po spawaniu, b) próbki wiósełkowe wycięte z formatek, c) próba rozciągania d) próbki po rozciąganiu

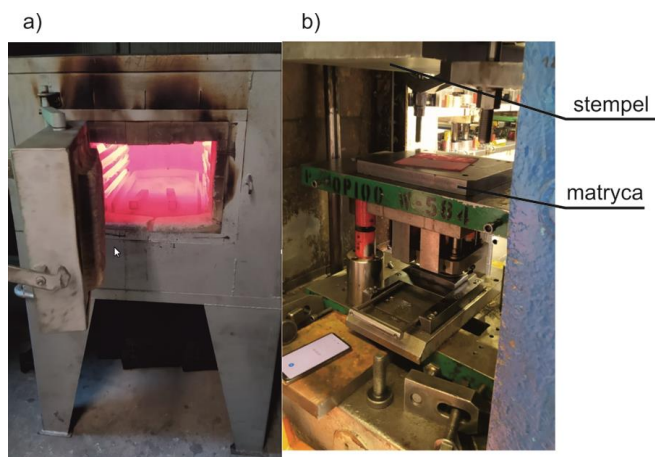
Wzorcowe parametry spawania laserowego formatek zostały ostatecznie potwierdzone pomyślnym testem rozciągania (pęknięcie próbki poza spoiną) oraz wynikiem badań metalograficznych (odpowiedni przetop, wymiary i kształt spoiny). W tabeli 3 przedstawiono wartości wzorcowych parametrów spawania laserowego formatek uzyskanych w wyniku badań.

Tabela 3 Wartości wzorcowych, dobranych doświadczalnie parametrów spawania

Parametr	Jednostka	Wartość nominalna	Tolerancja
Szerokość szczeliny	mm	0,15	±0,02
Moc wiązki lasera	W	2800	±200
Prędkość lasera	m/min	7	±0,5
Średnica plamki	µm	200	±50
Natężenie gazu ochronnego	l/min	20	±2

3. Badania zespawanych laserowo formatek po procesie hartowania

Po uzyskaniu odpowiednich parametrów spawania laserowego formatek ze stali Usibor 1500 i Usibor 2000 zapewniających odpowiednią jakość spoiny zespawano dodatkowo 8 płaskich formatek. Formatki te poddano obróbce cieplnej (hartowaniu) w warunkach podobnych jakie występują przy tłoczeniu na gorąco. Po wygrzaniu ich w komorze pieca hartowniczego w temperaturze 900 °C, formatka została przeniesiona pomiędzy płaską, chłodzoną wodą, matrycę i stempel, które zostały zamocowane na prasie hydraulicznej. Następnie prasa z pełną swoją siłą dociskała stempel do matrycy przez 10 sekund. W tym czasie nastąpiło hartowanie formatki. Cały proces pokazano na rysunku 6.

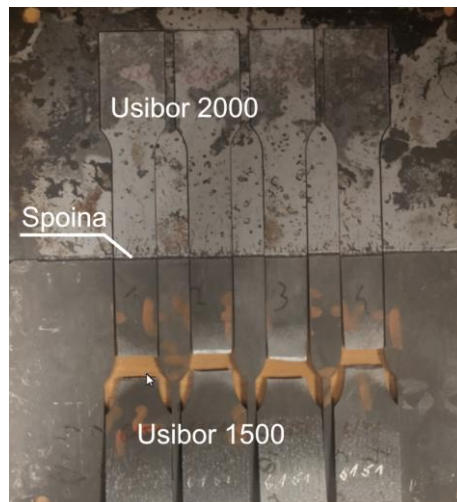


Rys. 6 a) piec hartowniczy do nagrzewania zespawanych formatek b) matryca i stempel do próby hartowania formatki

Po zahartowaniu płaska formatka została wyjęta i chłodzona na wolnym powietrzu do wystygnięcia do



temperatury otoczenia. Następnie została ona pocięta na próbki wiósełkowe, a próbki te zostały poddane rozciąganiu na maszynie wytrzymałościowej, w podobny sposób jak dla formatki nie hartowanych przedstawionych na rysunku 4. Na rysunku 7 przedstawiono próbki po zerwaniu. Należy podkreślić, że uległy one zerwaniu po stronie materiału Usibor 1500, poza spoiną.



Rys. 7 Zerwane próbki po procesie hartowania

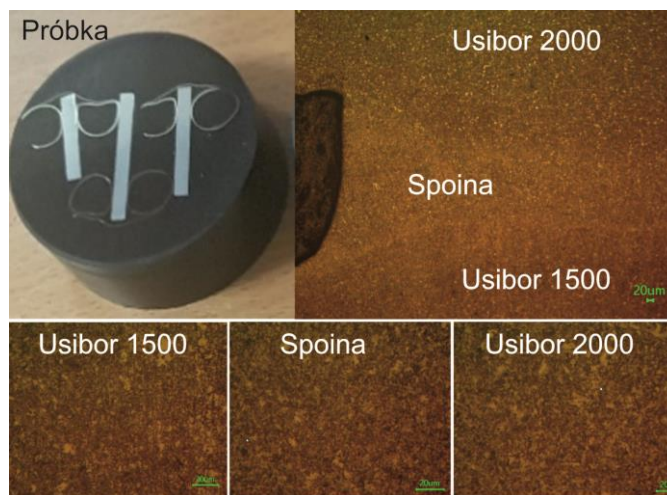
W tabeli 4 przedstawiono wartości parametrów R_e , R_m uzyskane po próbie rozciągania.

Tabela 4 Wyniki z próby rozciągania próbek po hartowaniu

Nr. próbki	$R_{p0.2}$ MPa	R_m MPa	A %
1	1112	1490	5,1
2	1069	1432	5,2
3	1063	1465	5,7
4	1074	1492	5,1
5	1085	1501	6,3
6	1095	1493	6,2
7	1071	1473	5,3
8	1052	1458	5,1
Max	1112	1501	6,5
min	1052	1432	5,1
Odch. Stand.	17,81	21,66	0,53

Analizując wyniki przedstawione w tabeli 1 można stwierdzić, że wyznaczone parametry mechaniczne są zgodne z parametrami dla stali Usibor 1500. Próbki uległy zerwaniu po stronie, gdzie zastosowano stal Usibor 1500.







Dodatkowo z próbek z rejonów zastosowania stali Usibor 1500, Usibor 200 oraz z rejonu spoiny wycięto na wycinarce wodno-ścierniej próbki do analizy mikrostruktury. Tak przygotowany materiał spoczył na spince metalograficznej, która pozwoliła na stabilne ułożenie pobranej próbki badaną powierzchnią materiału równolegle do stolika praski, w której następnie na gorąco zatopiono próbkę w żywicy fenolowej. W kolejnym etapie próbki wyszlifowano za pomocą tarcz diamentowych oraz przepolerowano przy użyciu zawiesin diamentowych $9\mu\text{m}$ i $3\mu\text{m}$ oraz tlenkowych $0,05\mu\text{m}$. Następnie zanurzono w 4% roztworze kwasu Nital-4. Materiał wytrawiano kilka sekund a następnie osuszono. Strukturę sprawdzono na 50 razowym powiększeniu przy użyciu mikroskopu typu: AmScope ME1200TC-5M Inverted Trinocular Metallurgical Microscope + 5MP Camera. Na rysunku 8 przedstawiono zdjęcie wykonanej próbki, zdjęcia z obrazu mikroskopu rejonu stali Usibor 1500, Usibor 2000 oraz rejonu spoiny.



Rys. 8 Zdjęcia wykonanej próbki, zdjęcia obrazu mikroskopu rejonu stali Usibor 1500, Usibor 2000 oraz rejonu spoiny

Obrazy mikroskopowe na rysunku 8 przedstawiają strukturę martenzytyczną, która jest strukturą wymaganą po procesie tłoczenia na gorąco. Przygotowane próbki do badań mikrostruktury posłużyły też do badań twardości Vickersa. Twardość zmierzono twardościomierzem typu HVD-50AP. Na każdej próbce (z każdego z trzech obszarów pomiarowych pomiarowego) wykonano po dwa odciski. Przykładowe wyniki pomiaru twardości Vickersa przedstawiono dla wybranej wyłoczeki z drugiej serii produkcyjnej przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5 Wyniki pomiaru twardości

Obszar	Nr. odcisku	Odcisk	Twardość HV
Usibor 1500	1		448,8
	2		449,8
Spoina	1		415,6
	2		426,6
Usibor 2000	1		459,0
	2		461,1

Analizując wyniki pomiaru twardości HV można stwierdzić, że we wszystkich obszarach pomiarowych (Usibor 1500, spoina, Usibor 2000) z których pobrano próbki twardość HV mieściła się ona w wymaganym zakresie od 400 do 550 HV.

4. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych prac zrealizowano cel badań jakim było dobranie wzorcowych parametrów spawania laserowego, tak aby uzyskać spoinę odpowiedniej jakości, o odpowiedniej wytrzymałości



mechanicznej i zgodności z wymaganiami określonymi w normach branżowych najważniejszych koncernów motoryzacyjnych. Badania dotyczyły spawania formatek o grubości 2 mm z dwóch rodzajów stali Usibor 1500 i Usibor 2000. Uzyskano spoiny, w których przetrop był na całej długości spoiny, bez widocznych pęknięć ani pęcherzy na powierzchni spoiny. W celu potwierdzenia poprawności uzyskanych parametrów wykonano odpowiednie próby rozciągania próbek wiósełkowych wyciętych z zespawanych formatek. Próby te wykonano dla formatek w stanie surowym jak i w stanie zahartowanym. Dodatkowo przeprowadzono badania makrograficzne uzyskanej struktury oraz zbadano twardość. Wyniki tych badań potwierdzają poprawne wykonanie spoin łączących dwa różne gatunki stali do tłoczenia na gorąco. Kolejnym etapem badań będą próby technologiczne wyprodukowania wytłoczek karoseryjnych (wnętrza słupka B) z zespawanych laserowo formatek z dwóch rodzajów stali, z wykorzystaniem tłoczni i oprzyrządowania oraz linii produkcyjnej do tłoczenia na gorąco.

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.**



Fundusze Europejskie
dla Śląskiego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Województwo
Śląskie

Literatura:

- [1] *Our common future by World Commission on Environment and Development*, 1987.
- [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.
- [3] Miyanishi, M. *Manufacturing of Light Weight Cars*, In Proceedings of the 13th International Conference on Metal Forming, Toyohashi, Japan, 19–22 September 2010.
- [4] Palmieri, M.E.; Galetta, F.R.; Tricarico, L. *Study of Tailored Hot Stamping Process on Advanced High-Strength Steels*. J. Manuf. Mater. Process. 2022, 6, 11, <https://doi.org/10.3390/jmmp6010011>.
- [5] Karbasian, H.; Tekkaya, A. *A review on hot stamping*, J. Mater. Process. Technol. 2010, 210, 2103–2118.
- [6] Turetta A., Bruschi S., Ghiotti A., *Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations*, Journal of Materials Processing Technology 2006, 177, pp. 396-400.
- [7] Horvath C.D. *Advanced steels for lightweight automotive structures*, Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles, Editor 1, P.K. Mallick, Woodhead Publishing 2010, 35-78.
- [8] Neugebauer R.; Schieck, F.; Polster, S.; Mosel, A.; Rautenstrauch, A. *Press hardening—An innovative and challenging technology* Arch. Civ. Mech. Eng. 2012, 12, 113–118.
- [9] Samadian P., O'Keeffe C., Butcher C., Worswick, M. J., *Fracture Response in Hot-Stamped Tailor-Welded Blanks of Ductibor® 500-AS and Usibor® 1500-AS: Experiments and Modelling*, Engineering Fracture Mechanics, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107864>.
- [10] Shi D., Watanabe K., Naito J., Funada K., Yasui K., *Design optimization and application of hot-stamped B pillar local patchwork blanks*, Thin-Walled Structures, Volume 170, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108523>.



Fundusze Europejskie
dla Śląskiego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Województwo
Śląskie