Laser welding of hot stamping blanks

Laserowe spawanie formatek do tłoczenia na gorąco

IRENEUSZ WRÓBEL
PIOTR DANIELCZYK*

DOI: https://doi.org/10.17814/mechanik.2023.4.9

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 shown. 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. Smooth tensile specimen were cut out of the welded blanks. The obtained microstructure and hardness tests were performed. The research results were discussed.
KEYWORDS: hot stamping, 22MnB5, 37MnB5, Usibor 1500, Usibor 2000, laser welding, hardening

W artykule opisano próby technologiczne laserowego spawania płaskich formatek o tej samej grubości, wykonanych z dwóch rodzajów stali do tłoczenia na gorąco. Pokazano oprzyrządowanie do spawania formatek. Przeprowadzono testy laserowego spawania formatek o grubości 2 mm z dwóch rodzajów stali – Usibor 1500 i Usibor 2000, przy różnych parametrach procesu. Z zespawanych formatek wycięto próbki wiosełkowe do badań wytrzymałościowych. Wykonano badania uzyskanej mikrostruktury oraz twardości. Omówiono wyniki badań.
SŁOWA KLUCZOWE: tłoczenie na gorąco, 22MnB5, 37MnB5, Usibor 1500, Usibor 2000, spawanie laserowe, hartowanie

Wprowadzenie

Wymagania związane z ochroną środowiska [1, 2] wymusiły na konstruktorach karoserii samochodów osobowych stosowanie nowych materiałów konstrukcyjnych oraz nowych technologii ich wytwarzania.

TABLE I. Mechanical properties of Usibor 1500 and Usibor 2000 steels [4]
TABLICA I. Właściwości mechaniczne stali Usibor 1500 i Usibor 2000 [4]

Nazwa handlowa stali	Granica plastyczności Rp_{02} [MPa]	Granica wytrzymałości Rm [MPa]	Wydłużenie A_{50} [%]
Usibor 1500	>1050	>1400	6
Usibor 2000	>1400	>1800	7

TABLE II. Chemical composition of Usibor 1500 and Usibor 2000 steels [4]
TABLICA II. Skład chemiczny stali Usibor 1500 i Usibor 2000 [4]

Nazwa handlowa stali	C [%]	Mn [%]	Si [%]	B [%]
Usibor 1500	0,25	1,4	0,4	0,005
Usibor 2000	0,36	0,8	0,8	0,005

Karoserie samochodów popularnych marek są obecnie lżejsze niż w poprzednich modelach o przynajmniej 20% [3], a w przypadku samochodów elektrycznych oczekiwany spadek masy jest jeszcze większy. Wynika to z konieczności zrównoważenia masy bardzo ciężkiego akumulatora.

Jedną z technologii, która umożliwia produkowanie podzespołów karoserii o bardzo dobrych właściwościach mechanicznych i jednocześnie o niskiej masie jest tłoczenie na gorąco. Do tego celu wykorzystuje się specjalną stal o oznaczeniu 22MnB5 (nazwa handlowa: Usibor 1500) oraz stosunkowo nowy gatunek stali 37MnB5 (nazwa handlowa: Usibor 2000). W tabl. I podano wartości parametrów mechanicznych obu stali po procesie tłoczenia i hartowania, a w tabl. II – ich skład chemiczny.

Proces tłoczenia na gorąco (*hot forming, press hardening*) polega na kształtowaniu płaskiej, nagrzanej do temperatury austenityzacji (ok. 930°C) formatki, ukształtowaniu wytłoczki oraz jej zahartowaniu. Hartowanie odbywa się w tłoczniku, pomiędzy zamkniętymi matrycą i stemplem, przy maksymalnym docisku prasy hydraulicznej (rys. 1).

Struktura stali z ferrytyczno-perlitycznej przemienia się w strukturę martenzytyczną. Aby zaszła przemiana martenzytyczna, konieczna jest szybkość chłodzenia wynosząca co najmniej 27°K/s [5, 6]. Z tego powodu w procesie tłoczenia na gorąco stosuje się tłoczniki o specjalnej konstrukcji, chłodzone wodą. Podczas takiego procesu uzyskuje się wytłoczki karoseryjne o bardzo wysokich właściwościach mechanicznych: granicy plastyczności Re = 1050÷1400 MPa, granicy wytrzymałości Rm = 1400÷1800 MPa i twardości 450÷500 HV.

Części karoseryjne produkowane metodą tłoczenia na gorąco mają znacznie mniejszą masę, ale zachowują wysokie parametry wytrzymałościowe [7, 8]. Bardzo dużą zaletą technologii tłoczenia na gorąco jest brak efektu sprężynowania powrotnego, czyli niekontrolowanego odkształcania się wytłoczek tłoczonych w temperaturze pokojowej (tłoczenie na zimno) ze stali o wysokich parametrach wytrzymałościowych.

W procesie tłoczenia na gorąco można produkować wytłoczki z obszarami o różnych parametrach mechanicznych. Konstruktorzy karoserii mogą więc projektować specjalne strefy zgniotu lub miejsca, w których projektowana wytłoczka ulegnie deformacji, pochłaniając

* Dr hab. inż. Ireneusz Wróbel, prof. ATH – iwrobel@ath.bielsko.pl, https://orcid.org/0000-0002-7587-0217 – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej; Polmotors sp. z o.o., Bielsko-Biała, Polska
Dr inż. Piotr Danielczyk – pdanielczyk@ath.bielsko.pl, https://orcid.org/0000-0002-7622-3150 – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej; Polmotors sp. z o.o., Bielsko-Biała, Polska

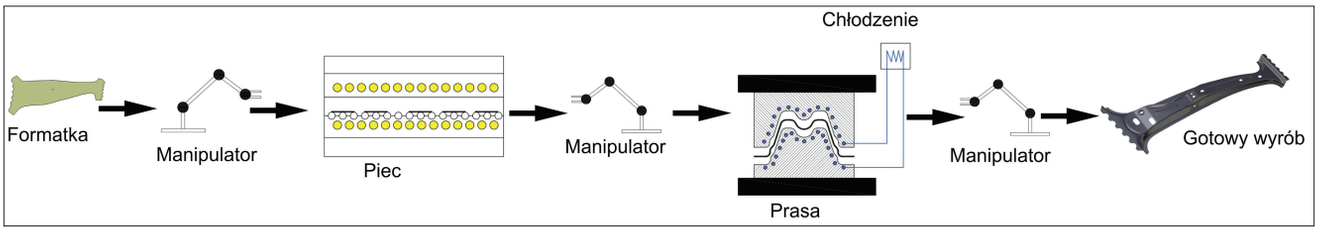


Fig. 1. Hot stamping process
Rys. 1. Proces technologiczny tłoczenia na gorąco

część energii uderzenia (np. podczas wypadku). Dzięki temu nowo projektowane karoserie samochodów spełniają coraz wyższe wymagania związane z bezpieczeństwem biernym.

Jest kilka metod uzyskania wytłoczki o zmiennych parametrach mechanicznych W jednej z nich wykorzystuje się do tłoczenia formatki o zmiennej grubości lub formatki wykonane z różnych gatunków stali [9, 10]. Takie zmienne właściwości formatki można uzyskać na dwa sposoby:

a) przez zastosowanie taśmy blachy z jednego gatunku stali ze zmienną grubością wydłuż jej szerokości (rys. 2*a*); taśma taka jest walcowana w hucie, aby uzyskać wymaganą grubość blachy w odpowiednim rejonie (*taylored rolled blank* – TRB),

b) przez zastosowanie dwóch lub więcej taśm o różnej grubości lub wykorzystanie stali o różnych właściwościach mechanicznych, ale o tej samej grubości (rys. 2*b*); taśmy te są spawane ze sobą laserowo i w ten sposób uzyskuje się formatkę o zmiennych parametrach (*taylored welded blank* – TWB).

W przypadku dużych serii produkcyjnych spawanie laserowe pasów blach można zlecić wyspecjalizowanej firmie. Dla małych serii produkcyjnych, zwłaszcza podczas jednostkowej lub małoseryjnej produkcji wytłoczek do karoserii samochodów klasy premium, spawanie laserowe formatek jest wykonywane w firmie produkującej wytłoczki.

W referacie zaprezentowano wyniki wstępnych badań nad technologią spawania laserowego płaskich formatek. Celem prezentowanych prac był taki dobór parametrów spawania, aby uzyskać spoinę o odpowiedniej jakości i wytrzymałości mechanicznej. W tym celu przeprowadzono testy laserowego spawania formatek o grubości 2 mm z dwóch rodzajów stali: Usibor 1500 i Usibor 2000. Poprawność uzyskanych wyników została potwierdzono testami wytrzymałościowymi próbek.

Dobór parametrów technologicznych do laserowego spawania formatek

Do badań nad doborem optymalnych parametrów spawania laserowego formatek wykorzystano maszynę TRUPMF TruDisk Cell 7040 (rys. 3). Urządzenie jest przystosowane do małoseryjnego spawania płaskich formatek.

Na podstawie analizy literatury oraz doświadczenia inżynierów zajmujących się spawaniem laserowym podzespołów karoseryjnych wyodrębniono cztery parametry spawania laserowego mające znaczący wpływ na jakość spoin: moc wiązki laserowej, położenie ogniska, prędkość spawania i szerokość szczeliny między formatkami. Zakres zmienności tych parametrów ustalono na:

- moc lasera 1,6÷3 kW,
- średnica plamki 100÷500 µm,
- prędkość spawania 4÷8 m/min,
- szerokość szczeliny 0÷0,2 mm.

Fig. 3. TRUPMF TruDisk Cell 7040 laser machine
Rys. 3. Maszyna TruDisk Cell 7040 firmy TRUPMF

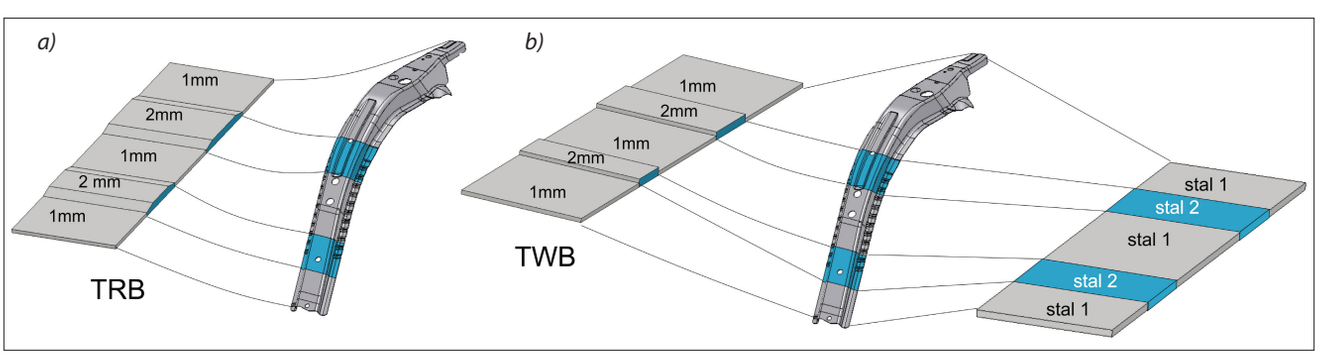


Fig. 2. Draw pieces with variable mechanical properties
Rys. 2. Wytłoczki o zmiennych właściwościach mechanicznych

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

Jakość spoin została zbadana zgodnie z wytycznymi norm PN-EN ISO 13919-1:2002, PN-EN ISO 5173:2010, PN-EN ISO 4136:2013-05 oraz według standardów firm motoryzacyjnych, takich jak Audi, BMW i Volvo. Badanie polegało na zespawaniu dwóch płaskich formatek w kształcie prostokąta o wymiarach 350 mm × 250 mm i grubości 2 mm. Jedna formatka była wykonana ze stali Usibor 1500, a druga ze stali Usibor 2000. Na rys. 4 przedstawiono formatki umieszczone w specjalnym przyrządzie przed spawaniem.

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 określnymi w normach branżowych oraz koncernów motoryzacyjnych. W przypadku wykonanych spoin przetop był jednakowy na całej długości, bez widocznych pęknięć czy pęcherzy na powierzchni. Z zespawanych formatek wycinano próbki wiosełkowe i rozciągano je na maszynie wytrzymałościowej, tak jak to przedstawiono na rys. 5.

TABLE III. Reference values of experimentally selected welding parameters
TABLICA III. Wartości wzorcowych, dobranych doświadczalnie parametrów spawania

Parametr	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 przepływu gazu ochronnego [l/min]	20	±2

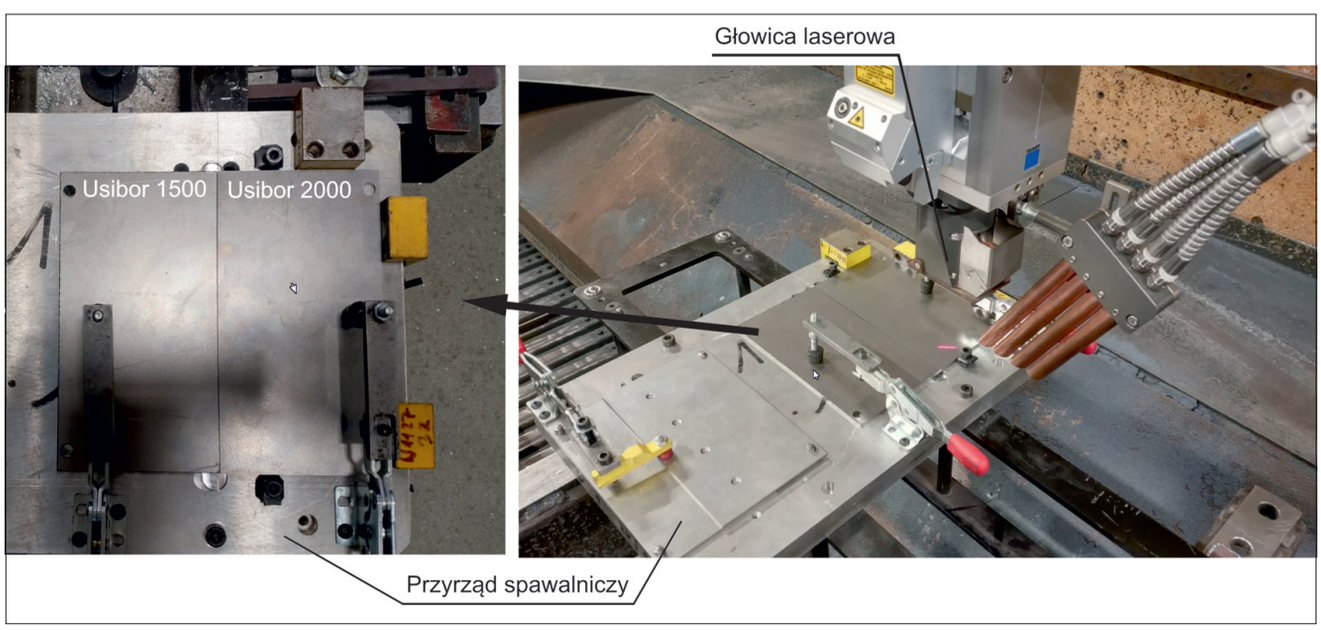


Fig. 4. Blanks before welding placed in the welding device
Rys. 4. Formatki przed spawaniem umieszczone w przyrządzie spawalniczym

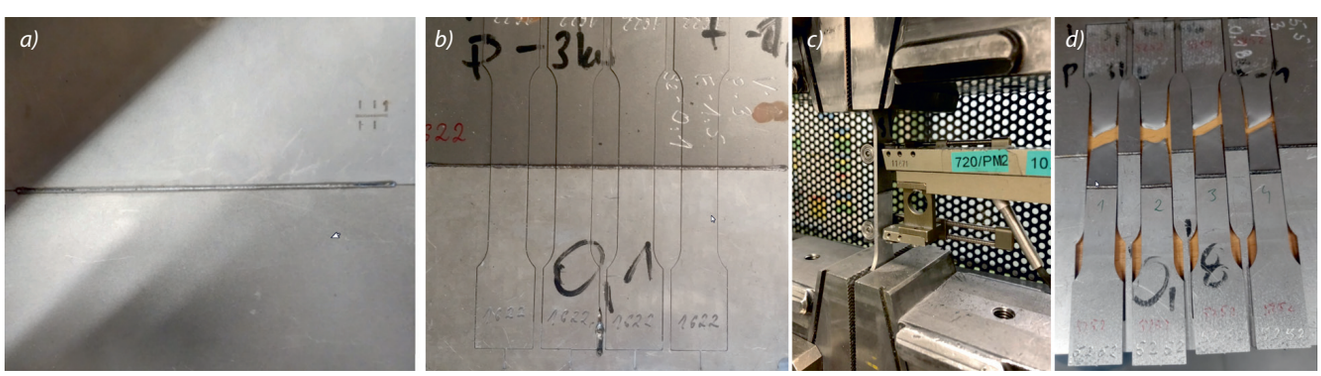


Fig. 5. Tensile test: *a*) blanks after welding, *b*) samples cut from the blanks, *c*) testing machine, *d*) samples after stretching
Rys. 5. Próba rozciągania: *a*) formatki po spawaniu, *b*) próbki wiosełkowe wycięte z formatek, c) maszyna wytrzymałościowa, *d*) próbki po rozciąganiu

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 tabl. III przedstawiono wartości wzorcowych parametrów spawania laserowego formatek uzyskane w wyniku badań.

Badania zespawanych laserowo formatek po procesie hartowania

Po doborze parametrów spawania laserowego formatek ze stali Usibor 1500 i Usibor 2000 zapewniających odpowiednią jakość spoiny zespawano dodatkowo osiem płaskich formatek. Formatki te poddano obróbce cieplnej (hartowaniu) w warunkach podobnych do tych, jakie występują podczas tłoczenia na gorąco. Po wygrzaniu ich w komorze pieca hartowniczego w temperaturze 930°C formatki zostały umieszczone w prasie, pomiędzy chłodzonymi matrycą i stemplem (rys. 6). Proces hartowania przy maksymalnym docisku prasy trwał 10 s.

Po zahartowaniu płaska formatka została wyjęta i schłodzona na wolnym powietrzu do temperatury otoczenia. Następnie – podobnie jak w poprzednich badaniach – przygotowano próbki wiosełkowe i przeprowadzono próbę rozciągania. Na rys. 7 przedstawiono próbki po zerwaniu. Należy podkreślić, że – tak jak podczas poprzednich testów – uległy one zerwaniu po stronie materiału Usibor 1500, poza spoiną.

W tabl. IV przedstawiono wartości parametrów $Rp_{0,2}$, *Rm* uzyskane po próbie rozciągania.

Na podstawie analizy wyników zaprezentowanych w tabl. IV można stwierdzić, że wyznaczone parametry mechaniczne są zgodne z oczekiwanymi własnościami dla stali Usibor 1500 po procesie hartowania.

Dodatkowo z wykonanych próbek wycięto na wycinarce wodno-ściernej fragmenty do analizy mikrostruktury. Pobrano je ze obszarów wykonanych ze stali Usibor 1500 oraz Usibor 2000 i z rejonu spoiny. Tak przygotowany materiał pozycjonowano spinką metalograficzną, a następnie zatopiono go w żywicy fenolowej. Na kolejnym etapie próbki wyszlifowano za pomocą tarcz diamentowych oraz wypolerowano z użyciem

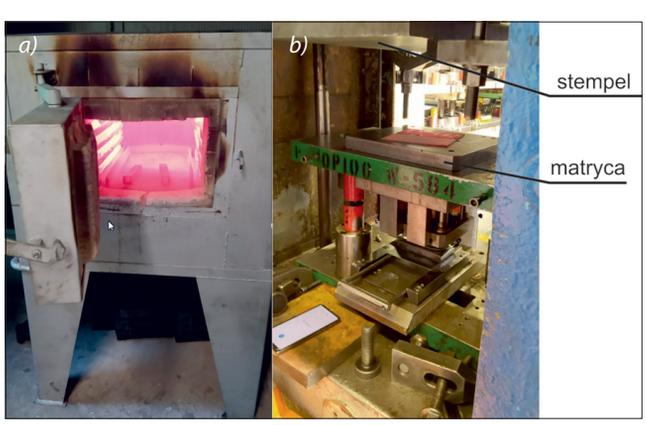


Fig. 6. Hardening process: *a*) hardening furnace for heating welded blanks, *b*) a die and a punch for the blank to hardening test
Rys. 6. Proces hartowania formatek: *a*) piec hartowniczy do nagrzewania zespawanych formatek, *b*) matryca i stempel do próby hartowania formatki

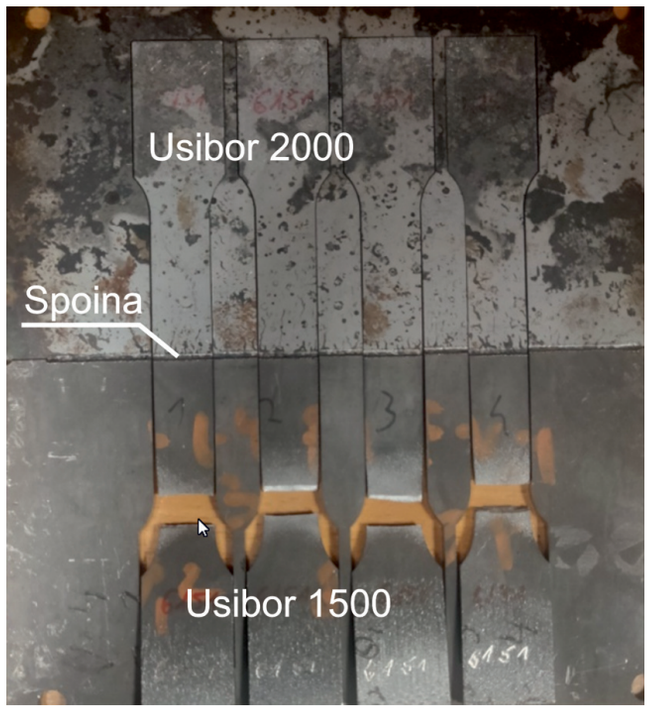


Fig. 7. Broken samples after the hardening process
Rys. 7. Zerwane próbki po procesie hartowania

TABLE IV. Results from the tensile test of the samples after hardening
TABLICA IV. Wyniki z próby rozciągania próbek po hartowaniu

Nr próbki	$Rp_{0,2}$ [MPa]	*Rm* [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
maks.	1112	1501	6,5
min.	1052	1432	5,1
odch. stand.	17,81	21,66	0,53

zawiesin diamentowych o wielkości ziarna 9 µm i 3 µm oraz tlenkowych o ziarnie 0,05 µm. Materiał wytrawiano w 4% roztworze kwasu Nital-4. Strukturę sprawdzono na 50-razowym powiększeniu przy użyciu mikroskopu typu: AmScope ME1200TC-5M Inverted Trinocular Metallurgical Microscope + 5MP Camera. Na rys. 8 przedstawiono jedną z próbek przygotowaną do badań oraz wynik analizy mikroskopowej.

Obrazy mikroskopowe przedstawiają strukturę martenzytyczną, wymaganą po procesie tłoczenia na gorąco, zapewniającą uzyskanie oczekiwanych własności mechanicznych wytłoczki. Próbki przygotowane do badań mikrostruktury posłużyły też do badań twardości Vikersa. Twardość zmierzono twardościomierzem typu HVD-50AP. Na każdej próbce (dla każdego z trzech obszarów pomiarowych) wykonano po dwa odciski. Przykładowe wyniki pomiaru twardości Vickersa dla wybranej wytłoczki przedstawiono w tabl. V.

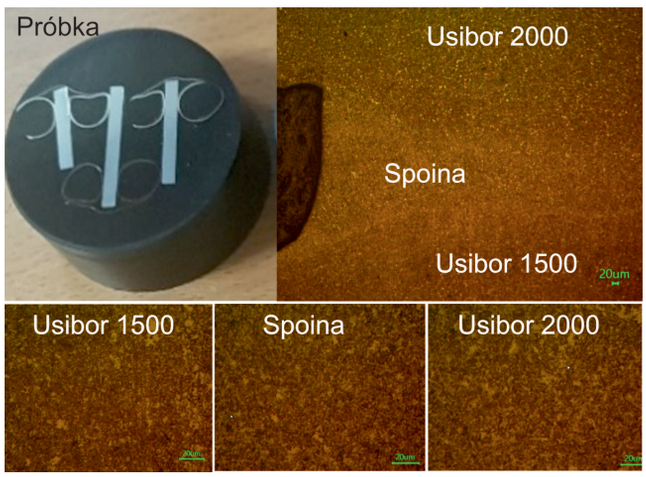
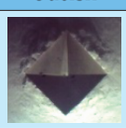
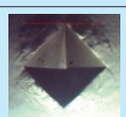
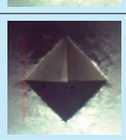


Fig. 8. Photos of the sample, photos of the microscope image of the Usibor 1500 and Usibor 2000 steel area and the weld area
Rys. 8. Zdjęcia próbki, obrazu z mikroskopu rejonu stali Usibor 1500 i Usibor 2000 oraz rejonu spoiny

TABLE V. Hardness measurement results
TABLICA V. 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

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

Podsumowanie i wnioski

W wyniku przeprowadzonych prac tak dobrano parametry spawania laserowego, aby podczas procesu uzyskać spoinę odpowiedniej jakości, zgodną z wymaganiami określnymi w normach branżowych i najważniejszych koncernów motoryzacyjnych. Badania dotyczyły spawania formatek o grubości 2 mm z dwóch rodzajów stali: Usibor 1500 i Usibor 2000. Uzyskano spoiny, w których przetop był na całej ich długości, bez widocznych pęknięć czy pęcherzy na ich powierzchni. W celu potwierdzenia poprawności uzyskanych parametrów przeprowadzono próby rozciągania próbek wiosełkowych wyciętych z zespawanych formatek. Próby te wykonano dla formatek w stanie surowym i w stanie zahartowanym. Dodatkowo przeprowadzono badania mikroskopowe uzyskanej struktury oraz zbadano twardość.

Wyniki 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 tłocznika i oprzyrządowania oraz linii produkcyjnej do tłoczenia na gorąco.

Badania współfinansowano z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego 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] World Commission on Environment and Development. "*Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*". (1987), https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf.
[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), http://data.europa.eu/eli/dir/2019/1161/oj.
[3] Miyanishi M. "Manufacturing of Light Weight Cars". *Proceedings of the 13th International Conference on Metal Forming*. (19–22 September 2010), Toyohashi, Japan.
[4] Palmieri M.E., Galetta F.R., Tricarico L. "Study of Tailored Hot Stamping Process on Advanced High-Strength Steels". *J. Manuf. Mater. Process*. 6, 11 (2022), https://doi.org/10.3390/jmmp6010011.
[5] Karbasian H., Tekkaya A. "A review on hot stamping". *J. Mater. Process. Technol.* 210 (2010): 2103–2118, https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.019.
[6] Turetta A., Bruschi S., Ghiotti A. "Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations". *Journal of Materials Processing Technology.* 177 (2006): 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.* 12 (2012): 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 with local patchwork blanks". *Thin-Walled Structures.* 170 (2022), https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108523.