

XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2022

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

Odporność udarowa połączenia spawanego stali wysokowytrzymałej w wyniku ostrzału pociskiem 7,62 × 54 mm ŁPS

Martyna Zemlik¹, Dariusz Pyka^{2*}, Łukasz Konat¹, Krzysztof Jamroziak²

¹Katedra Inżynierii Pojazdów, Politechnika Wrocławska

²Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej, Politechnika Wrocławska

email: martyna.zemlik@pwr.edu.pl, dariusz.pyka@pwr.edu.pl, krzysztof.jamroziak@pwr.edu.pl

STRESZCZENIE: Połączenia spawane stali ulepszanych cieplnie stanowią jedno ze słabszych „ogniw” konstrukcji. Wykonywanie tych połączeń wymaga dużych umiejętności i wiedzy aby nie doszło do osłabienia materiału. Producenci stali ulepszanych cieplnie (pancernych) podają wytyczne i wymagania jakimi należy się kierować podczas wykonywania spoin. Zatem istnieje potrzeba sprawdzenia takich spoin w zakresie ich odporności. W tym celu przeprowadzono szereg badań z wykorzystaniem metod numerycznych - metodą elementów skończonych oraz badań eksperymentalnych. Badania eksperymentalne wykonano na torze balistycznym, gdzie próbki z połączeniami spawanymi stali wysokowytrzymałej Hardox 450 ostrzelano pociskiem 7,62 × 54 mm ŁPS. Połączenie spawane były testowane w dwóch wariantach, pierwszym połączenie spawane poddano obróbce cieplnej, w drugim wariantcie bez takiej obróbki. Na tej podstawie zbudowano modele numeryczne i dokonano ich analizy. Uzyskano odpowiednią korelację przyjętych założeń w modelowaniu numerycznym w odniesieniu do wyników doświadczalnych.

SŁOWA KLUCZOWE: stal wysokowytrzymała, połączenie spawane, obróbka cieplna, udarność, metoda MES/SPH

1. Wprowadzenie

Ze względu na wysokie własności mechaniczne i plastyczne, niskostopowe stale martenzytyczne z borem są wiodącym materiałem metalicznym stosowanym na osłony balistyczne. Pomimo że producenci nie dostarczają danych na temat własności wytrzymałościowych stali wyższej klasy, tj. Armo Advance czy Mars 650, na podstawie badań uwzględniających zbliżone gatunkowo stale Hardox 600 i Extreme można uznać, że ich wytrzymałość R_m przekracza wartość 2000 MPa [1, 2]. Należy zaznaczyć, że powyższe stale również charakteryzują niską zawartością pierwiastków szkodliwych, drobnoziarnistą strukturą, zadowalającymi wskaźnikami plastycznymi, w związku z czym mogą być z powodzeniem stosowane jako alternatywne rozwiązanie dla stali pancernych.

Części opancerzonych pojazdów są ze sobą łączone głównie technikami spawalniczymi. Jednak proponowane przez producentów stali rozwiązania, w tym stosowanie dedykowanych materiałów spawalniczych, są niewystarczające w kwestii sprawności i wydajności maszyn. Stąd poszukiwanie optymalnych rozwiązań prowadzi do różnych form badań takich połączeń. W pracy [3] zajęto się oceną wpływu napawania łukowego przeniesionego plazmą. Natomiast w pracy [4] połączenia spawane badano na ostrzał pociskiem 7,62 × 54 mm B32.

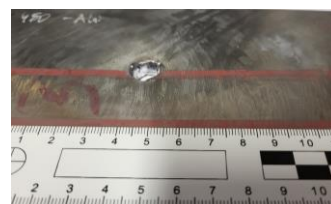
Niemniej w obszarze strefy wpływu występuje tzw. karb mikrostrukturalny, przejawiający się spadkiem właściwości mechanicznych aż o 50%. Zmiękczenie materiału jest szeroko analizowanym zagadnieniem przy spawaniu materiałów wysokowytrzymałych i jedynie poprzez zastosowanie zaawansowanych technologii

i późniejszą obróbkę cieplną [5], można uzyskać najwyższe wskaźniki wytrzymałościowe.

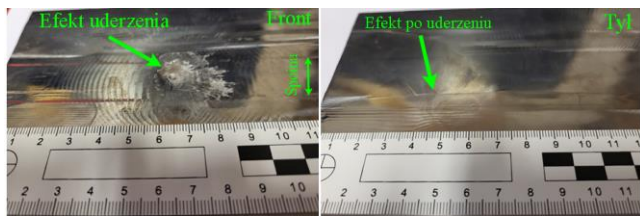
Celem pracy jest wykazanie zdolności odporności udarowych połączeń spawanych w wyniku przeprowadzenia odpowiednich zabiegów obróbki cieplnej. Cel ten realizowano z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

2. Materiał i metody

Do badań wykorzystano arkusze blachy o grubości 10 mm, które połączono dwustronną spoiną doczołową z zastosowaniem technologii spawania łukiem krytym pod topnikiem (SAW). Następnie materiał poddano zabiegom kompleksowej obróbki cieplnej, uwzględniającej procesy normalizowania i hartowania. W celu wyeliminowania zmiennych uwzględniających karb geometryczny i grubość elementu, arkusz blachy został sfrezowany do 8 mm. Po czym tak przygotowane próbki zostały ostrzelane na torze balistycznym z odległości 10 m amunicją karabinową z pociskiem 7,62 × 54 mm ŁPS zgodnie z normą PN EN 1522. Efekty ostrzelanych próbek zostały zobrazowane na poniższych rysunkach (rys. 1 i 2).



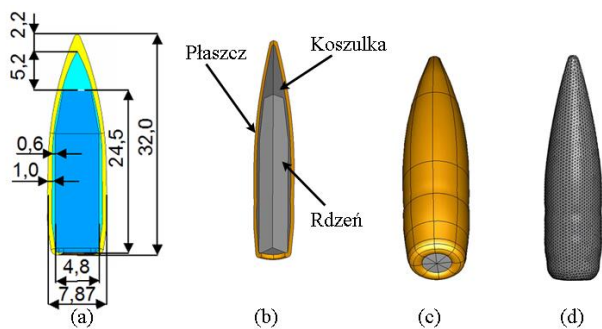
Rys. 1. Widok na spoinę próbki bez obróbki cieplnej



Rys. 2. Widok na spoinę próbki obrabianej cieplnej

3. Założenia i symulacje

Na podstawie geometrii pocisku karabinowego został opracowany model geometryczny i numeryczny. W modelu zostały uwzględnione następujące elementy składowe (rys. 3).

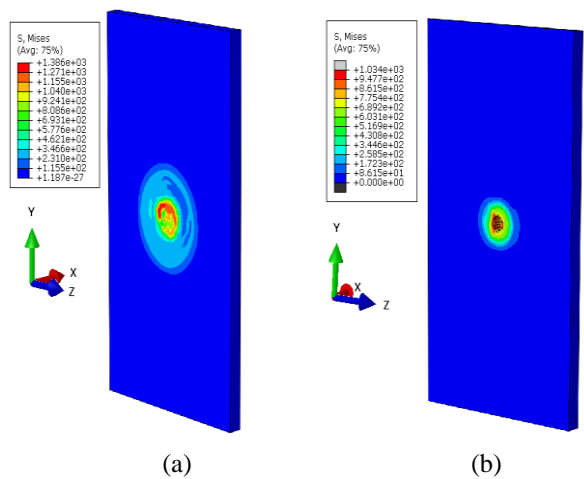


Rys. 3. Modele pocisku karabinowego 7,62 × 54 mm ŁPS: (a) wymiary poszczególnych składowych, (b) składowe pocisku, (c) model geometryczny, (d) model numeryczny

Przyjęto prędkość początkową pocisku na poziomie 820 m/s i masę pocisku 9,6 g. Dyskretyzację pocisku i materiału osłony wraz ze spoiną przeprowadzono bryłowymi elementami skończonymi typu Tetra o wielkości 1,0-2,0 mm. Nieliniową analizę dynamiczną przeprowadzono w programie Abaqus/Explicit. W modelach dyskretnych zastosowano model materiałowu Johnson-Cook. Na potrzeby odzwierciedlenia nieciągłości struktury spowodowanej rozerwaniem materiału wprowadzono odkształcenie graniczne (ϵ_{gr}) jako parametr mechaniki pękania. Odkształcenie graniczne wyznaczono dla 3 stref materiałowych: strefa materiału bazowego, strefa wpływu ciepła, strefa spoiny. W przypadku próbki obrabianej cieplnie wyznaczono jedno odkształcenie związku z obróbką cieplną w całej objętości materiału. Przyjęte dane materiałowe zestawiono w tab. 1. Przykład wyników analizy numerycznej przedstawiono na rys. 4.

Tabela 1. Stałe materiałowe

Materiał	E [GPa]	ν [-]	A [MPa]	B [MPa]	m [-]	n [-]
Rdzeń (St. 45)	210,0	0,32	430,0	820	1,03	0,3
Płaszcz	210,0	0,33	350,0	420	1,03	0,3
Koszulka	16,0	0,42	5,15	3,5	1,03	0,5
Spoina bez OC	210,0	0,32	677,0	680,0	1,0	0,3
Spoina z OC	210,0	0,30	1350,0	1362,0	1,0	1,0



Rys. 4. Wyniki analizy numerycznej: (a) próbki OC, (b) próbki bez OC

4. Dyskusja i podsumowanie

Widoczny wpływ obróbki cieplnej bezpośrednio wpływało na poprawę właściwości mechanicznych w tym odporności na udarność. Próbka obrabiona cieplnie zatrzymała pocisk 7,62 × 54 mm ŁPS. W przypadku próbki bez obróbki cieplnej spoina nie stanowi dużej bariery. Po uzyskanym otworze widać, że materiał spoiny jest mało plastyczny. To samo obserwuje się na symulacji (rys. 4b), gdzie lokalne pole pracy jest niewielkie, o czym świadczy, że ciśnienie panujące pod penetrującym pociskiem powoduje wybijanie tego materiału w kształcie korka. Takim stanem charakteryzuje się materiał o strukturze kruchej i niewielkim zakresie pełzania materiału spoiny. Jak wykazano ważnym elementem jest spoina o odpowiedniej charakterystyce wytrzymałościowej, odpowiednio zbliżonej do rodzimego materiału, łączonych ze sobą techniką spawania.

Obliczenia przeprowadzono przy wsparciu Wrocławskiego Centrum Sieciowo-Superkomputerowym, grant nr 452, (<http://www.wcss.pl>).

Literatura

- [1] Konat Ł., Jasiński R., Białobrzeska B., Szczepański Ł., *Analysis of the static and dynamic properties of wear-resistant Hardox 600 steel in the context of its application in working elements*, Materials Science-Poland, Vol. 39, No. 1, pp. 86-102, 2021, <https://doi.org/10.2478/msp-2021-0007>.
- [2] Białobrzeska B., Jasiński R., Konat Ł., Szczepański Ł., *Analysis of the Properties of Hardox Extreme Steel and Possibilities of its Applications in Machinery*, Metals, Vol. 11, e162, 2021, <https://doi.org/10.3390/met11010162>.
- [3] Balakrishnan M., Balasubramanian V., Madhusudhan Reddy G., *Effect of PTA Hardfaced Interlayer Thickness on Ballistic Performance of Shielded Metal Arc Welded Armor Steel Welds*, J. of Materi. Eng. and Perform., Vol. 22, pp. 806-814, 2013, <https://doi.org/10.1007/s11665-012-0338-5>.
- [4] Naveen Kumar, S., Balasubramanian, V., Malarvizhi, S., Hafeezur Rahman A., Balaguru V., *Effect of Welding Consumables on the Ballistic Performance of Shielded Metal Arc Welded Dissimilar Armor Steel Joints*, J. of Materi. Eng. and Perform., Vol. 31, pp. 162-179, 2022, <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06219-9>.
- [5] Konat Ł., *Technological, Microstructural and Strength Aspects of Welding and Post-Weld Heat Treatment of Martensitic, Wear-Resistant Hardox 600 Steel*, Materials, Vol. 14, e4541, 2021, <https://doi.org/10.3390/ma14164541>.