



## Nowe techniki wybuchowego odkształcania i platerowania oraz ich zastosowania

### *New explosive deformation and coating techniques and applications*

(1) Mykhaylo V. Zagirnyak\*, (2) Volodymir V. Dragobetskii, (3) Aleksandr A. Shapoval

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyy National University, vol. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine

#### Informacje o artykule

Zgłoszenie: 23.06.2016

Recenzja: 8.08.2016

Akceptacja: 16.12.2016

#### Wkład autorów

- (1) Koncepcja i założenia, przygotowanie artykułu
- (2) Badanie zastosowań zgrzewania wybuchowego
- (3) Badania mechaniczne i metalograficzne

#### Streszczenie

Platerowanie/zgrzewanie wybuchowe stanowi technologię przyszłości procesu realizowanego w stanie stałym, w celu wytwarzania bimetalowych płyt o wyjątkowych właściwościach mechanicznych i korozyjnych, dla potrzeb przemysłowych. W procesie wybuchowego zgrzewania, kontrolowana energia materiałów wybuchowych jest wykorzystywana do tworzenia wiązania metalicznego pomiędzy różnymi materiałami. W artykule przedstawiono analizę wybuchowego odkształcania i zgrzewania blach bimetalowych w celu wyznaczenia warunków zgrzewania. Warunki zgrzewania dostrajano jednocześnie poprzez związanie geometrii ścieżki z różnymi obciążeniami wybuchowymi. Badanie zostało przeprowadzone w celu oceny wpływu obciążeń wybuchu na powierzchnię połączenia i scharakteryzowania spoin po wybuchu. Badania metodą mikroskopii optycznej wykazały, że przechodzenie z gładkiej powierzchni styku w falistą zachodzi wraz ze wzrostem obciążenia wybuchu. Badania metodą elektronowej mikroskopii skaningowej wskazują, że powierzchnia rozdziału charakteryzuje się ostrym przejściem między dwoma materiałami. Opracowano rzeczywiste aplikacje wybuchowego platerowania obudowy maźnicy. Łożyska maźnicy składają się z obudowy i łożysk tocznych oraz są częściami istotnymi dla bezpieczeństwa w pojazdach szynowych. Obudowy łożysk maźnicy produkowane są z odlewów zaprojektowanych zgodnie z wymaganiami klienta. Zwiększenie ich trwałości przez wzmocnienie stalą jest bardzo ważne. Przedstawiono technologię wybuchowego platerowania wzmacniającego dwóch rodzajów maźnic.

**Słowa kluczowe:** zgrzewanie wybuchowe, wiązanie metaliczne, obudowy łożysk maźnicy, stal manganowa Hadfielda, surówka hutnicza, czoło wybuchu, warunki zgrzewania

#### Article info

Received: 23.06.2016

Reviewed: 8.08.2016

Accepted: 16.12.2016

#### Authors' contribution

- (1) Concept and assumptions, preparation of the article
- (2) Investigation of the explosive welding application
- (3) Mechanical and metallographic investigations

#### Abstract

Explosive cladding/welding is a potential solid state technology to fabricate bimetal plates with unique mechanical and corrosion properties for industrial needs. In explosive welding process, the controlled energy of explosives is used to create a metallurgical bond between dissimilar materials. This paper presents the examination of explosive deformation and welding of the bimetal plates for determination of welding window. The welding conditions are tailored through parallel geometry route with different explosive loads. The study was conducted to consider the effects of explosive loading on the bonding interface and to characterise the explosive welds. Optical microscopy studies show that a transition from a smooth interface to a wavy one occurs with increase in explosive load. Scanning electron microscopy studies show that the interface was characterised by characteristic sharp transition between two materials. The real applications of explosive cladding of axle-box housings are developed. Axle-box bearings are made up of a railway housing and rolling bearing, and are safety-relevant components in rail vehicles. The axle-box bearing housings are produced from cast material and designed according to the customer's specifications. An increase of their longevity by rein-

\* Autor do korespondencji. Tel.: +380 5366 36218; e-mail: mzagirn@kdu.edu.ua

\* Corresponding author. Tel.: +380 5366 36218; e-mail: mzagirn@kdu.edu.ua

*forcing with steels is of great importance. The explosive cladding technologies of reinforcing axle-boxes of two types are presented.*

**Keywords:** *explosive welding process, metallurgical bond, axle-box housings, Hadfield's manganese steel, pig iron, explosion front, welding window*

## 1. WSTĘP

Przez długi czas, w przewozie towarów masowych dominowały koleje, a wagony kolejowe projektowano tak, aby umożliwić efektywną realizację powyższego na różnego rodzaju infrastrukturze kolejowej. W ostatnim czasie, ze zmianami w zapotrzebowaniu przemysłu oraz z konkurencją transportu drogowego i lotniczego, koleje realizowały zmniejszający się stale udział przewozów. Trend ten od niedawna zaczął się zmieniać (w niektórych krajach), z powodu zatoru drogowego. Ze względu na to, Biała Księga Europejskiego Transportu z roku 2011 [1] określiła cel modalnego przesunięcia (o 30% do roku 2030 i 50% do 2050 roku) z transportu drogowego do innych rodzajów transportu takich, jak kolejowego lub wodnego dla odległości ponad 300 km.

Bariery dla zwiększonego przesunięcia modalnego z transportu drogowego na szynowy wydają się być, w dużej mierze, spowodowane wymogami skrócenia czasu end-to-end nowoczesnych spedytorów, a także większej niezawodności usług. Jak wynika z [2], mniejsze prędkości dla towarowego transportu kolejowego, w porównaniu z usługami pasażerskimi, nie są związane przede wszystkim z mniejszą (możliwą) maksymalną prędkością pojazdu, lecz są spowodowane faktem, że pociągi towarowe często podróżują po liniach o mniejszych prędkościach lub są przetrzymywane do przepuszczenia ruchu pasażerskiego oraz ze względu na skomplikowane i długotrwałe manewrowania; operacje przeładunku oraz zmiany jednostki napędowej i załogi.

Niemniej jednak, jeśli prędkość pojazdów towarowych, możliwości przyspieszania i hamowania mogłyby pozwolić na pełne zintegrowanie z ruchem pasażerskim przyniosłoby to stopniową zmianę w zakresie prędkości end-to-end pociągu towarowego i wzrost ogólnej wydajności systemu. Kluczowym czynnikiem w uzyskaniu tej zwiększonej prędkości jest za-

## 1. INTRODUCTION

*For a long time railways have been predominant in the transport of bulk goods and railway wagons have been designed to allow this to be effected efficiently on different types of railway infrastructure. In more recent times, with changes in industrial needs and competition from road and air transport railways have carried an ever declining share of freight. At present time this trend recently started to change in some countries due to road congestion. For this reason, the European Transport White paper 2011 [1] sets a target for modal shift of 30% by 2030 and 50% by 2050 from road freight to other modes such as rail or waterborne transport for distances over 300 km.*

*The barriers to this increased modal shift from road to rail seem to be largely due to the requirements from modern shippers for shorter end-to-end times, and for higher reliability of service. As shown by [2], the lower speeds for rail freight compared with passenger services are not mainly related to lower vehicle speed capability but are more due to the fact that freight trains often travel on lower speed lines or are held for passenger traffic to pass and due to complex and lengthy shunting and handling operations and motive power and crew changes.*

*Nevertheless if freight vehicle speeds and acceleration and braking capabilities could allow them to be fully integrated with passenger traffic this would bring a step change in end-to-end of freight train speeds as well as overall system capacity. A key factor in obtaining this increased speed is to ensure that the dynamic performance of freight vehicles can allow safe and reliable operation on track with different levels of irregulari-*

pewnienie, że dynamika pojazdów towarowych może umożliwić bezpieczną i niezawodną pracę na torze przy różnych poziomach występujących zmienności oraz warunków eksploatacji. Z tego punktu widzenia wzrost trwałości obudowy łożyska maźnicy jest bardzo ważny. Celem niniejszej pracy jest opracowanie technologii wzmocnienia maźnicy materiałami odpornymi na ścieranie

Maźnice to element łączący, znajdujący się pomiędzy obracającym się zestawem kołowym a quasi-statyczną ramą wózka jezdnego lub podwozia pojazdu kolejowego. Wszystkie siły działające pomiędzy tymi komponentami są przenoszone za pośrednictwem sprężyn, amortyzatorów i elementów prowadzących. Maźnice oraz zespoły łożyskowe maźnic zawsze były istotnym elementem niezawodności taboru kolejowego i mają istotny wpływ na bezpieczeństwo, niezawodność pracy i ekonomię kolei [3]. Obudowy łożysk są wykonane z materiału odlewane i zaprojektowane zgodnie z wymaganiami klienta. Wszystkie obudowy łożysk kolejowych są obliczone z pomocą MES, zoptymalizowane pod kątem naprężeń i zaprojektowane zgodnie z określonymi wartościami granicznymi. Amortyzatory cierne są znane w zawieszeniach wagonów towarowych od roku 1935. Elementami tarciovymi są rzeczywiście amortyzatory cierne zintegrowane w zawieszeniach łączonych z obudową maźnicy. Są to ważne elementy, które odgrywają decydującą rolę przy kontrolowaniu dynamiki wagonu. Zawieszenia tarciove klinowe znalazły szerokie zastosowanie w wózkach jezdnych wagonów towarowych, prawie na całym świecie, ze względu na szeroki zakres korzyści takich, jak: proste wytwarzanie, niski koszt i łatwa konserwacja [4]. Zwiększenie odporności na ścieranie powierzchni obudów maźnicy jednostek ciernych jest głównym celem rozwoju technologicznego.

Zgrzewanie wybuchowe jest znaną technologią spajania, nadającą się do tego przypadku. Platerowanie wybuchowe (rys. 1) jest procesem spajania, w którym energia uwalniana z detonacji materiału wybuchowego jest wykorzystywana do tworzenia wiązania metalicznego między dwoma lub większą liczbą różnych metali [5]. Przy detonacji, energia potencjalna, zgromadzona w materiale wybuchowym, przekształca

*ties and support conditions. From this viewpoint, an increase longevity of axle-box bearing housings is very important. A goal of this paper is to develop technology of the axle-box bearing housings reinforcement with wear resistant materials.*

*Axle-boxes are the linking design element between the rotating wheel set and the quasi-static frame of the bogie or running gear of a railway vehicle. All forces acting between these components are transmitted via springs, dampers and guiding elements. Axle-boxes and axle-box bearing units have always been a vital component in the reliability of railway rolling stock and they have a considerable influence on the operating safety, reliability and economics of railways [3]. The axle-box bearing housings are made of cast material and designed according to the customer's specifications. All railway housings are calculated by FEM, stress-optimized, and designed in accordance with the specified limiting values. Friction damping has been common in freight wagon suspensions since 1935. Friction elements are actually friction dampers integrated into suspensions connected with axle-box housing; they are important components which play decisive roles in controlling wagon dynamics. Friction wedge suspensions have found broad application in freight bogies almost all over the world due to a wide range of advantages, such as simple manufacture, low cost and low maintenance [4]. The increase of wear resistance of the axle-box housing surfaces of the friction units is the main aim of the technology development.*

*The explosion welding is known to be the bonding technology suitable for this case. Explosion cladding (Fig. 1) is a bonding process in which the energy released from a detonating chemical explosive is employed to create a metallurgical bond between two or more dissimilar metals [5]. On detonation, the potential energy, stored in the chemical explosive, is converted in-*

się natychmiast ( $\approx 50 \mu\text{s}$ ) w energię kinetyczną, dzięki przemieszczaniu się płyty nastrzeliwanej.

Zgrzewanie wybuchowe jest procesem łączenia metali w stanie stałym, który wytwarza spoinę zgrzewaną przez wysokiej prędkości skośne uderzenie, wspomagane przez kontrolowaną detonację ładunku wybuchowego [6]. Ładunek wybuchowy po zdetonowaniu przyspiesza płyty do prędkości, przy której tworzy się wiązanie metaliczne pomiędzy składnikami, metalami podczas uderzenia. Podczas wysokiej prędkości skośnego (kąta uderzenia  $\beta$ , rys. 1) zderzenia płyt metalowych formowany jest strumień energii o dużej prędkości pomiędzy płytami metalowymi, jeśli kąt uderzenia  $\beta$ , prędkość uderzenia  $V_F$ , spełniają warunki wymagane do spajania [6]. Powłoki tlenkowe na powierzchni hamują spajanie. Z tego powodu utworzenie wiązania metalicznego na powierzchni styku jest możliwe poprzez skruszenie i rozpuszczanie warstwy tlenkowej, poprzez uderzenie o dużej prędkości płytą nastrzeliwaną. W związku z tym płyty metalowe, które mają być łączone, należy oczyścić na całej powierzchni z warstwy tlenkowej techniką strumieniową. W punkcie zderzenia dziewiczo czyste powierzchnie są ze sobą dociskane pod bardzo wysokim ciśnieniem [6]. Ciśnienie musi być na tyle wysokie i występować przez wystarczająco długi czas, aby osiągnąć wiązanie metaliczne. Prędkość punktu zderzenia  $V_c$  reguluje czas konieczny do utworzenia wiązania. Wysokie naprężenia kontaktu (normalne i styczne) na powierzchni styku powodują również znaczne, lokalne odkształcenia plastyczne obu metali [6, 7].

Wielkość energii kinetycznej wykorzystanej na powierzchni styku decyduje o tworzeniu się falistości powierzchni rozdziału [7]. Istnieją dwa rodzaje stopów odlewniczych stosowanych w produkcji obudowy łożysk: a) stopy Al-Mg oraz b) stale węglowe. Zatem zadaniem technologii wybuchowej ma być rozwiązanie, technologia:

- a) zgrzania pomiędzy stopem aluminium i blachą ze stali węglowej,
- b) a także zgrzania pomiędzy stalą węglową i stalą manganową Hadfielda.

W drugim przypadku, wymagana jest warstwa pośrednia kompatybilna zarówno ze stalą wę-

*stantaneously ( $\approx 50 \mu\text{s}$ ) into kinetic energy due to movement of flyer plate.*

*Explosive welding is a solid state metal joining process which produces a weld joint by high velocity oblique impact, aided by controlled detonation of an explosive charge [6]. The explosive charge, when detonated, accelerates the plates to a speed at which a metallic bond is formed between the metal components during the collision. During the high velocity oblique (impact angle  $\beta$ , Fig. 1) collision of metal plates, a high velocity jet is formed between the metal plates if the impact angle  $\beta$  and impact velocity,  $V_F$ , are in the range required for bonding [6]. The surface oxide films suppress bonding. For this reason, establishment of the metallurgical bond at the interface is possible by fracture and dissolution of the oxide films due to high velocity impact of the flyer plate. Therefore, the metal plates to be joined need to be cleaned of any surface film by the jet action. At the collision point, virginally clean surface are brought together under very high pressure [6]. The pressure has to be sufficiently high and for a sufficient length of time to achieve metallurgical bonds. The velocity of the collision point,  $V_c$ , governs the time available for bonding. The high contact normal and shear stresses at the interface also cause considerable local plastic strains of both metals [6, 7].*

*The extent of kinetic energy spent at the interface dictates the formation of smooth wavy interface [7]. There are two types of cast alloys used for axle-box housing manufacturing: a) Al-Mg alloys and b) carbon steels. So, task of the explosion technology to be developed is to make:*

- a) welding between Al alloy and carbon steel plate, and*
- b) welding between carbon steel and Hadfield's manganese steel.*

*For the second case, an interlayer compatible with both carbon steel and Hadfield's manganese*

lową, jak i stalą manganową Hadfielda, co zmniejszy rozpraszanie energii kinetycznej i zwiększy powierzchnię wymiany ciepła oraz zgrzewalność [7].

Zgodnie z rys. 1, warunki zgrzewania określają możliwości wykonania dopuszczalnych okładzin z wykorzystaniem różnych parametrów takich, jak prędkość zderzenia, kąt uderzenia lub prędkość płyty nastrzeliwanej i kąt zderzenia, które zostały zaproponowane dla konwencjonalnego dwuosioowego platerowania [5, 6]. Ostatnio autorzy [6] dokonali przeglądu istniejących koncepcji i modeli procesu w celu określenia dolnej granicy, która odpowiada niższej prędkości zgrzewania i minimalnemu kątowi zderzenia zgrzewania. Niemniej jednak badania nad znaczeniem warstwy pośredniej przy kontrolowaniu dolnej granicy obszaru zgrzewania są nadal ograniczone. Wprowadzenie warstwy pośredniej znacznie poprawia wykorzystanie energii kinetycznej i hamuje tworzenie stopionych związków między-metalicznych na powierzchni styku.

## 2. PROCEDURA EKSPERYMENTALNA

Skład chemiczny stali i stopów Al stosowanych w eksperymencie, przedstawiono w tab. 1. Materiał płyty podłoża jest stalą niskowęglową zawierającą dodatki stopowe. Materiał płyty nastrzeliwanej AlMgSi1 jest wyżarzonym stopem aluminium. W tab. 2 przedstawiono podstawowe dane, dotyczące stosowanych arkuszy blachy. Wielkość próbki wynosi 50x200 mm.

steel is required because it will reduce the kinetic energy dissipation and increase heat transfer area and weldability [7].

As shown on Fig. 1, welding windows define the domains of acceptable clads using various parameters as collision velocity impact angle or flyer plate velocity-impact angle and were proposed for conventional biaxial cladding [5, 6]. Recently, authors [6] reviewed the existing concepts and models for determining the lower boundary which correspond to lower welding velocity and minimum collision angle of weldability window. Nevertheless, studies on the influence of interlayer in controlling the lower boundary of the welding domain are still limited. The introduction of interlayer significantly enhances the kinetic energy utilization and suppresses the formation of molten intermetallic compounds at the interface.

## 2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

The chemical composition of steels and Al alloys used in the experiment is shown in Tab. 1. The base plate material is a low carbon and alloy contains steel. The flyer plate material AlMgSi1 is an annealed aluminum alloy. The Tab. 2 shows the basic parameters of the used sheets. The samples size was 50x200 mm.

Tab. 1. Skład chemiczny materiałów (%)

Tab. 1. Chemical composition of the materials (%)

	Cu	Si	Mn	Mg	Fe	Cr	Ti	Zn
cząsteczka stopu Al / Al alloy	<0,1	0,8–1,4	0,4–1,2	0,4–1,2	<0,6	<0,2	<0,2	<0,2
	C	Mn	Cr	Ni	Si	S	P	Al
stal miękka / mild steel	0,1–0,3	0,8–1,5	<0,3	<0,5	<0,6	<0,042	<0,042	<0,1
stal Hatfielda, ASTM 128 Gr B2 Hatfield steel, ASTM 128 Gr B2	1,0–1,2	<0,3	11,5–14	<0,5	<0,6	<0,042	<0,042	<0,1

Tab. 2. Wymiary i właściwości mechaniczne stosowanych materiałów

Tab. 2. Sample dimensions and mechanical properties

	Wymiary, mm Dimensions, mm	Grubość, mm Thickness, mm	Mikrotwardość, HV Microhardness, HV	Granica plastyczności, MPa Yield strength, MPa
płyta nastrzeliwana, A6061 flyer plate, A6061	50x200	5,0	90	90

	Wymiary, mm <i>Dimensions, mm</i>	Grubość, mm <i>Thickness, mm</i>	Mikrotwardość, HV <i>Microhardness, HV</i>	Granica plastyczności, MPa <i>Yield strength, MPa</i>
plyta podłoża, stal miękka <i>base plate, mild steel</i>	50x200	10,0	140	240
plyta podłoża, stal Hatfielda <i>base plate, Hatfield steel</i>	50x200	10,0	380	540

Zastosowana technologia zgrzewania wybuchowego była realizowana w tradycyjnym układzie (rys. 1). Płyta podłoża i płyta nanoszona są równoległe, natomiast materiał wybuchowy znajduje się bezpośrednio na powierzchni płyty nanoszonej bez warstwy zderzaka (rys. 1). Charakterystyka stosowanych materiałów wybuchowych przedstawiona jest w tab. 3.

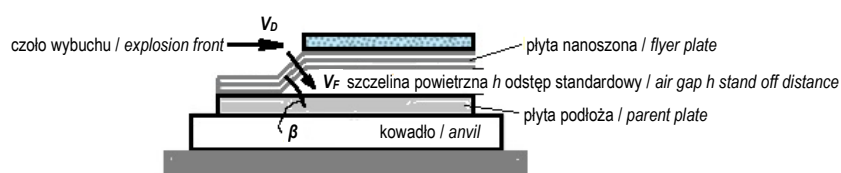
The used explosive welding technology was a traditional setup (Fig. 1). The base plate and the flyer plate are parallel and the explosive find directly on the surface of the flyer plate without buffer see (Fig. 1). Characteristics of explosives used are shown in Tab. 3.

Tab. 3. Charakterystyka materiałów wybuchowych

Tab. 3. Characteristics of explosives

N	Nazwa materiału wybuchowego <i>Explosive title</i>	Skład % / <i>Composition %</i>		Prędkość detonacji $V_D$ , m·s <sup>-1</sup> <i>Detonation velocity <math>V_D</math>, m·s<sup>-1</sup></i>	Średnica krytyczna $d_{cr}$ , mm <i>Critical diameter <math>d_{cr}</math>, mm</i>
		azotan amonu <i>ammonium nitrate</i>	trinitrotoluol		
1	Amoniak 6GV / <i>Ammonia 6GV</i>	71	29	$\frac{4200}{4120^*}$	6 *
2	Amoniak AC1 / <i>Ammonia AC1</i>	85	15	$\frac{3200 - 3600}{3510^*}$	18–20
3	Amoniak AC2 / <i>Ammonia AC2</i>	90	10	(3000–3100)*	
4	Amoniak AC3 / <i>Ammonia AC3</i>	94	6	$\frac{2100 - 2600}{2440^*}$	24–28
5	Amoniak AC4 / <i>Ammonia AC4</i>	99	2	1700–1900*	38–40

Uwaga: \* – dane eksperymentalne; prędkości są inne niż w [6] oraz ASTM Handbook  
Note: \* – experimental data; other velocities are from [6] and ASTM Handbook



Rys. 1. Schemat zgrzewania wybuchowego

Fig. 1. Explosive welding schematics

Prędkość zderzenia ( $V_c$ ) musi być mniejsza od prędkości dźwięku ( $V_s$ ). Oznacza to konieczność zastosowania w tej technologii materiałów wybuchowych o małej prędkości (#5, tab. 3). Ciśnienie między przylegającymi powierzchniami na froncie zderzenia musi przekroczyć granicę plastyczności materiałów dla zaistnienia odkształcenia plastycznego, jeśli przyjąć, że jest to zgrzewanie w stanie stałym pod skrajnym ciśnieniem [6]. Przed zgrzewaniem wybuchowym zetknięte powierzchnie zostały oczyszczone

The velocity of the collision ( $V_c$ ) must be lower than the speed of the sound ( $V_s$ ), that means a low speed explosive is to be used in this technology (#5, Tab. 3). The interfacial pressure at the collision front also must exceed the materials yield strength to enable a plastic deformation because it seems to be the solid state welding under extreme pressure [6]. Before the explosive welding the contacted surfaces were cleaned by mechanical and chemical cleaning to remove the polluted and oxide layer. Application of the various

mechanicznie i chemicznie, w celu usunięcia warstwy zanieczyszczonej i tlenkowej. Zastosowanie różnych materiałów wybuchowych (tab. 3) powoduje zmianę prędkości zderzenia. Kąt zderzenia  $\beta$  dla każdej prędkości zderzenia wyznaczono na podstawie analizy geometrycznej oraz mikrostruktury obszaru przejściowego zgrzewanej próbki ( $V_F$ , rys. 1).

Wyznaczenia właściwości mechanicznych zgrzeiny wybuchowej dokonano na podstawie badań mikrotwardości i próby rozciągania zgodnie z normami ASTM E8 i ISO. Do scharakteryzowania struktury spoiny wykorzystano mikroskopię optyczną i elektronową mikroskopię skaningową.

### 3. WYNIKI I OMÓWIENIE

#### 3.1. Spoiny stop Al – stal

Wiadomo, że najważniejszym czynnikiem dla uzyskania dobrych spoin jest dobór materiału wybuchowego o wymaganej prędkości detonacji. Wykazano, że prędkość zderzenia  $V_c$  i prędkość płyty  $V_p$  powinny być mniejsze od prędkości dźwięku, w każdym przypadku zgrzewania [6–9]. Prędkość dźwięku w materiałach konstrukcyjnych wynosi zwykle 4,5–6 km/s [9]. Jak wskazali autorzy pracy [9], materiały o wysokiej prędkości detonacji nie nadają się do zgrzewania wybuchowego. Nasze receptury mieszaniny azotanu amonowego i trinitrotoluolu (tab. 3) pozwalały na uzyskanie prędkości detonacji, zazwyczaj, od 2 do 3 km/s. Materiał wybuchowy powinien również zapewnić równomierną detonację tak, aby osiągnąć prędkość zderzenia jednorodną od początku do końca spoiny. Falista powierzchnia styku stanowi cechę charakterystyczną spoiny wybuchowej. Powstawanie fali przy zgrzewaniu wybuchowym może być traktowane jako szczególny przypadek ogólnego zjawiska, tworzenia się fali na granicy faz przy pewnych warunkach przepływu.

Tworzenie się fal może być wynikiem zmian rozkładu prędkości w punkcie zderzenia i okresowych zaburzeń w materiale [9]. Wyniki eksperymentalnej oceny obszaru zgrzewania o falistej powierzchni kontaktu pokazano na rys. 2.

*explosives (Tab. 3) results in variation of collision velocity. Collision angle  $\beta$  for each collision velocity was determined based on geometrical and microstructure analysis of a welded sample transition area ( $V_F$ , Fig. 1).*

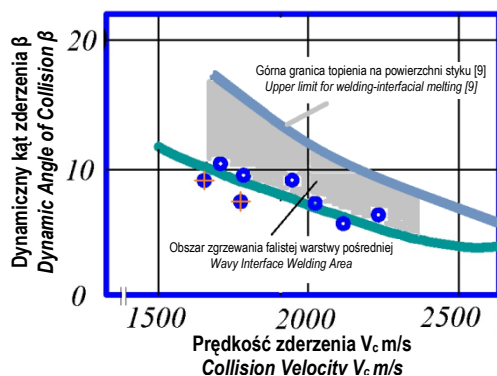
*Explosive weld mechanical properties determination was made by microhardness tests and tensile tests in accordance with ASTM E8 and ISO standards. Optical and scanning electron microscopy are applied for weld structure characterization.*

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Al alloy – Steel Welds

*It is known the most important factor for obtaining consistent good welds is the selection of an explosive that will produce the required detonation velocity. It has been shown that the collision velocity  $V_c$  and the plate velocity  $V_p$  should be less than the velocity of sound in either welding component [6–9]. The velocity of sound in engineering materials is typically 4.5–6 km/s [9]. As shown by authors [9] the high velocity explosives are not suitable for explosive welding. Our recipes of mixture of ammonium nitrate and trinitrotoluol (Tab. 3) allow to obtain detonation velocity typically between 2 and 3 km/s. The explosive must also provide uniform detonation so as to achieve a collision velocity that will be uniform from the start to finish of the weld. Wavy interface is the characteristic feature of explosive welds. The wave formation in explosive welding can be regarded as a special case of general phenomena of interfacial wave formation under certain flow circumstance.*

*Wave formation appears to be the result of variations in the velocity distribution at collision point and periodic disturbances of materials [9]. Results of experimental definition of wavy interface welding region is shown on Fig. 2.*



Rys. 2. Warunki zgrzewania stali – stopu aluminium w zakresie prędkości zderzenia 1500–2500 m/s

Fig. 2. Welding window of Steel –Aluminum Alloy in the range of collision velocities of 1500–2500 m/s

Prędkość detonacji materiału wybuchowego nr 4 (tab. 3) kontrolowano przez dodanie substancji obojętnych (piasek). Falistość granicy rozdziału stwierdzono podczas analizy metalograficznej.

Wyniki badań wykazują, że falistą granicę rozdziału otrzymuje się w zakresie kątów dynamicznego zderzenia  $\beta=5-10^\circ$ . Materiały wybuchowe oparte na azotanie amoniaku są do tych celów najbardziej przydatne. Krzywa eksperymentalna (rys. 2) odpowiada dolnej granicy kąta dynamicznego  $\beta$ , co jest zgodne z danymi określonymi w [9]. Górna granica dla zgrzewania wyznaczono na podstawie równań empirycznych Deribas, Crossland i Wittman cytowanych w [9].

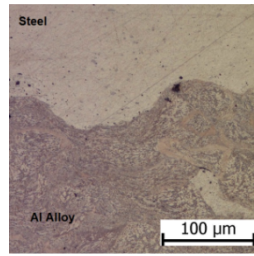
Mikrofotografię spawanych wybuchowo blach stal – stop Al pokazano na rys. 3. Można zauważyć, że nie ma żadnych stopionych stref w obszarze spoiny. Falista powierzchnia styku może być utworzona w wyniku uderzenia płyty nanoszonej o płytę podstawową w miarę postępu detonacji. Jeśli strumień energii generowany przy detonacji o wysokiej prędkości nie wydostaje się, to jest on wówczas częściowo lub całkowicie uwięziony w obszarze spoiny pomiędzy metalami o podobnej gęstości lub, w jednym zawirowaniu przed i po każdej fali, na styku metali o znacząco różnej gęstości. W przypadku łączenia wybuchowego Al – stal, falista struktura granicy rozdziału wygląda regularnie i równo. Duże odkształcenie stopu aluminium w strefie spoiny jest wyraźnie widoczne, co wskazuje na powstawanie adiabaticznych niestabilności ścinających, które przyczyniają się do powstania wiązania metalicznego.

*Detonation velocity of explosive no. 4 (Tab. 3) was controlled by addition of inert ingredient (sand). The presence of wavy interface was defined by metallographic analysis.*

*Experimental results reveal that wavy interface is obtained in the range of dynamic collision angles,  $\beta=5-10^\circ$ . The ammonia nitrate based explosives are most suitable for these purposes. The obtained experimental curve (Fig. 2) corresponds to lower limit of the dynamic angle  $\beta$  which is in accordance with data stated in [9]. The upper limit for welding is shown on the base of empirical equations of Deribas, Crossland and Wittman cited in [9].*

*The micrograph of the explosively welded Al alloy – steel plates is shown on Fig. 3. One can note there is no molten zone at the weld area. The wavy interfaces are seen to be formed due to impact of the flyer with the base plate, as the detonation proceeds. If the jet generated in the high velocity impact does not escape, then it is partially or completely trapped in a weld area between metals of similar density or in a single vortex before and after each wave in the interface between metals of appreciably different densities. In case of Al – steel explosive interface, the wavy structure looks like regular and even. The severe deformation of Al alloy in the weld area is clearly seen, which allows to assume creation of adiabatic shear instabilities which contribute to metallurgical bonding.*





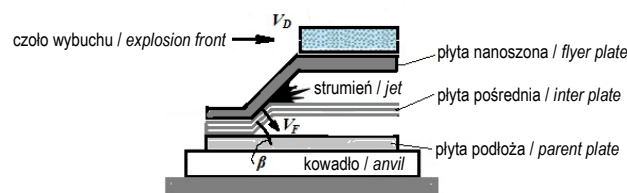
Rys. 3. Mikrostruktura spoiny stopu Al–stal; trawienie stopu Al odczynnikamiem  $\text{FeCl}_3$   
 Fig. 3. Microstructure of Al Alloy–Steel weld; etching of Al alloy with  $\text{FeCl}_3$  reactive

### 3.2. Spoiny stal Hatfielda – miedź – stal

Schemat wybuchowego procesu zgrzewania z wykorzystaniem warstwy pośredniej pokazano na rys. 4. Jak wykazali autorzy [10] wprowadzenie warstwy pośredniej znacznie poprawia wykorzystanie energii kinetycznej i hamuje tworzenie stopionych związków międzymetalicznych na powierzchni styku. Jest to bardzo ważne dla zastosowań w kolejnictwie opisanych we wstępie. Niniejsze opracowanie koncentruje się na zastosowaniu miedzianej warstwy pośredniej przy wybuchowym zgrzewaniu stali Hatfielda i stali węglowej, ocenie mikrostruktury w strefie spoiny i jej właściwości mechanicznych.

Wyniki badań wykazują, że grubość warstwy pośredniej wpływa znacznie na wytrzymałość na ścinanie w obszarze spoiny (rys. 5). Zależność wytrzymałości na ścinanie od względnej grubości międzywarstwy wynosi maksymalnie około 100MPa, co odpowiada względnej grubości 0,2. Oznacza to, że określenie grubości warstwy pośredniej jest jednym z głównych sposobów określania parametrów zgrzewania wybuchowego.

Zastosowanie miedzi, jako warstwy pośredniej, powoduje zmianę mechanizmu zachowania odkształcenia na powierzchni styku, ponieważ miedź ma zwiększoną wrażliwość na tworzenie pasma adiabatycznego ścinania przy dużej prędkości odkształcania.



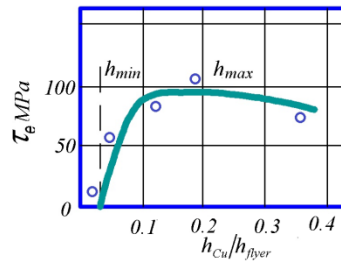
Rys. 4. Schemat zgrzewania wybuchowego z warstwą pośrednią  
 Fig. 4. Schematics of explosive welding with an intermediate layer

### 3.2. Hatfield Steel – Copper – Steel Welds

The schematics of explosive welding process with use of interlayer is shown on Fig. 4. As shown by authors [10, 11], the introduction of interlayer significantly enhances the kinetic energy utilization and suppresses the formation of molten intermetallic compounds at the interface. It is very important for the railway applications described in introduction. This study focuses on the use of Copper interlayer for explosive welding Hatfield steel and carbon steel, characterization of weld area microstructure and its mechanical properties.

The experimental results demonstrate that thickness of the intermediate layer greatly influences the shear strength of weld field (Fig. 5). The dependence of shear strength on the relative thickness of inter layer as maximum about 100 MPa which corresponds to relative thickness of 0.2. It means that determination of the intermediate layer thickness is one of the main methods of explosive welding parameters determination.

Application of Copper intermediate layer results in change of mechanism of deformation behavior at the interface because Copper has an increased sensitivity to adiabatic shear band formation at high velocity deformation.

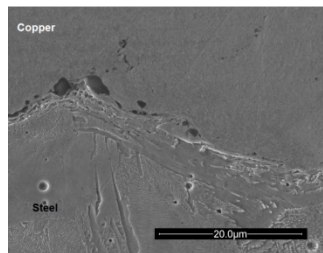


Rys. 5. Właściwości mechaniczne spoiny różniących się metali, uzyskane za pomocą zgrzewania wybuchowego

*Fig. 5. Mechanical properties of dissimilar metal joint obtained by explosive welding*

Aby zdefiniować cechy odkształcania z wysoką prędkością na powierzchni złącza, przeprowadzono analizę mikrostruktury (rys. 6).

*To define the features of high velocity deformation at the interface, microstructural analysis was performed (Fig. 6).*



Rys. 6. Mikrostruktura stali węglowej – powierzchnia styku miedzi w obszarze spoiny; stal trawiono w nitalu 3%

*Fig. 6. Microstructure of carbon steel – copper interface at the weld area; steel is etched by Nital 3%*

Wyniki pokazują silną deformację zarówno miedzianej, jak i stalowej płyty podłoża. Widoczna jest również falista budowa złącza. Stwierdzono, że wprowadzenie warstwy pośredniej znacznie przesunęła dolną granicę mniejszych kątów zderzenia przy zgrzewaniu oraz zmniejszyła straty energii kinetycznej przy powierzchni zderzenia. Grubość i właściwości materiału warstwy pośredniej znacząco wpływają na proces zgrzewania wybuchowego i zmniejszają prędkość zderzeń. Warstwa pośrednia z miękkiego metalu, umożliwiająca utworzenie pasm ścinania adiabatycznego w złączu, jest odpowiednia przy stosowaniu materiału wybuchowego o wyższej prędkości detonacji. Optymalne warunki eksperymentalne zgrzewania pozwalają uzyskać faliste złącze przy mniejszych kątach zderzeń i prędkościach płyty.

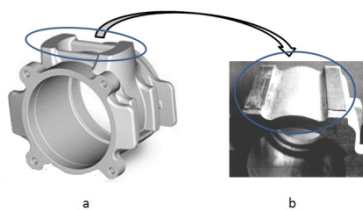
*The results reveal severe deformation of both copper and steel parent plate. The wavy morphology of the interface is seen as well. It is found the introduction of interlayer significantly shifts the lower boundary of welding window smaller collision angles and reduces the kinetic energy loss at the collision interface. The thickness and material properties of interlayer significantly influence the explosive welding process and shift it lower collision velocities. Soft metal interlayer able to create the adiabatic shear bands at the interface is suitable when higher detonation velocity explosive is employed. The optimal experimental conditions of welding result in a wavy interface at lower collision angles and plate velocities.*

### 3.3. Przykłady zastosowania

Przykłady aplikacji zgrzewania wybuchowego dla wzmocnienia maźnic pokazano na rys. 7 i 8.

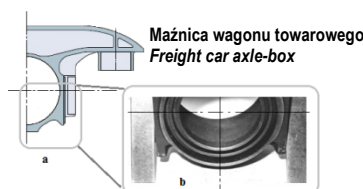
### 3.3. Application cases

*The explosive welding application cases for axle-boxes reinforcing are shown on Fig. 7 and 8.*



Rys. 7. Maźnica odlewana ze stopu Al wzmocniona blachą stalową

Fig. 7. Cast Al Alloy axle-box housing reinforced with steel plate



Rys. 8. Maźnica stalowna wagonu towarowego wzmocniona blachą ze stali Hatfielda

Fig. 8. Cast steel freight car axle-box reinforced with Hatfield steel plate

Maźnice do lokomotyw, wagonów pasażerskich i towarowych charakteryzują się szczególnie wysokimi obciążeniami. Ze względów bezpieczeństwa, łożyska wykorzystywane w zastosowaniach transportowych szybkobieżnych są wykonane ze stali, która podlega szczególnym wymaganiom, w odniesieniu do czystości materiału. Łożyska te są wyposażone w uszczelnienia bezstykowe, aby mogły być eksploatowane przy niskich temperaturach; stosowany jest także specjalny smar do pracy przy wysokich prędkościach. Pociągi wykorzystywane w lokalnym transporcie pasażerskim muszą hamować co kilka minut, co stanowi szczególnie wyzwanie dla smaru. W przeciwieństwie do tego, łożyska stosowane w transporcie pasażerskim dalekiego zasięgu są projektowane dla większych prędkości. Konstrukcja niskopodłogowa niektórych tramwajów oznacza, że nie mogą być stosowane wózki, stąd, zamiast nich stosuje się osie niskopodłogowe z indywidualnymi zestawami łożysk. Z powodu wymienionych cech charakterystycznych maźnic, powstała potrzeba wzmocnienia obudów maźnic, w celu zwiększenia ich trwałości. Aby osiągnąć ten cel, obszary o wysokich obciążeniach kontaktowych i intensywnym zużyciu ciernym zostały wzmocnione metodą wybuchową okładziny, z wykorzystaniem wyżej opisanych wyników doświadczalnych. Wyniki badań eksploatacyjnych zostaną przedstawione w przyszłości.

*Axle-box bearings for locomotives, passenger and freight cars are characterized by their particularly high load ratings. For safety reasons, the bearings used in high-speed transportation applications are manufactured from steel that is subject to specific requirements with regard to the purity of the material. These bearings are equipped with non-contact seals to allow them to be operated at low temperatures, and special high-speed grease is also used. Trains used in local passenger transport have to brake every few minutes, which poses a particular challenge for the lubricating grease. Contrastingly, the bearings used in long-distance passenger transport are designed for higher speeds. The low-floor design of some streetcars means that bogies cannot be used, so low-floor axles with individual bearing supports are used instead. The mentioned specific features of the axle-boxes result in need of reinforcing the axle-box housings to increase their longevity. The areas of high contact loads and intensive wear were clad with explosion to achieve this goal based on the described experimental results. The results of exploitation tests will be presented in the future.*

#### 4. PODSUMOWANIE

- Warunki zgrzewania złącza stal – aluminium są zdefiniowane dla zakresu prędkości zderzenia od 1500 do 2500 m/s.
- Grubość pośredniej warstwy Cu dla złącza stal miękka – stal Hatfielda jest określona w przedziale 0,5–2 mm dla płyty nastrzelwanej o grubości 5 mm.
- Wzmacniano rzeczywiste maźnice, a mikrostruktura złączy wykazuje cechy zgrzewania wybuchowego (falistość, silne odkształcenie powierzchni złącza).

#### LITERATURA

1. European Commission. 2011. *White paper – roadmap to a single European transport area – towards a competitive and resource efficient transport system*. COM 144 final, Brussels, 28 March 2011.
2. Iwnicki S.D., S. Stichel, A. Orlova, M. Hecht. 2015. „Dynamics of railway freight vehicle”. *Vehicle System Dynamics*, 53 (7): 995–1033. DOI: 10.1080/00423114.2015.1037773
3. Railway technical handbook. 2004. Vol. 1: 42–71.
4. Qing W., C. Cole, M. Spiriyagin, Y.Q. Sun. 2014. „A review of dynamics modelling of friction wedge suspensions”. *Vehicle System Dynamics* 52 (11): 1389–1415, DOI: 10.1080/00423114.2014.943249;
5. Butler D.J., D.G. Brasher. 2012. „Explosion welding high temperature and wear resistant metal liners into 25mm gun barrels”. *Materials and Manufacturing Processes* 27: 888–891.
6. Blazynsky T.Z. 1983. *Explosive forming welding and compaction*. Applied Science Publishers LTD.
7. Manikandan P., K. Hokamoto, M. Fujita, K. Raghukandan, R. Tomoshige. 2008. „Control of energetic conditions by employing interlayer of different thickness for explosive welding of titanium-304 stainless steel”. *Journal of Materials Processing Technology* 195: 232–240.
8. Saravanan S., K. Raghukandan. 2012. „Thermal kinetics in explosive cladding of dissimilar metals”. *Science and Technology of Welding and Joining* 17 (2): 99–103.
9. Akbari Mousavi S.A.A., P. Farhadi Sartangi. 2009. „Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel”. *Materials and Design* 30: 459–468.
10. Saravanan S., K. Raghukandan. 2013. „Influence of Interlayer in Explosive Cladding of Dissimilar Metals”. *Materials and Manufacturing Processes* 28: 589–594.
11. Shapoval A.A., Mos'pan, D.V. & Dragobetskii, V.V. 2016. „Ensuring High Performance Characteristics For Explosion-Welded Bimetals”. *Metallurgist* 60 (3): 313–317. DOI: 10.1007/S11015-016-0292-9.

#### 4. CONCLUSION

- *Welding window of steel – aluminum alloy joint is defined for the range of collision velocities of 1500–2500 m/s.*
- *The intermediate Cu layer thickness for Mild Steel-Hatfield Steel joint is determined in the range of 0.5–2 mm for flyer plate with thickness of 5 mm.*
- *The real axle-box bearings are armoured, and microstructure of joints demonstrates the explosion welding features (waviness, severe deformation of an interface area).*

#### REFERENCES

1. European Commission. 2011. *White paper – roadmap to a single European transport area – towards a competitive and resource efficient transport system*. COM 144 final, Brussels, 28 March 2011.
2. Iwnicki S.D., S. Stichel, A. Orlova, M. Hecht. 2015. „Dynamics of railway freight vehicle”. *Vehicle System Dynamics*, 53 (7): 995–1033. DOI: 10.1080/00423114.2015.1037773
3. Railway technical handbook. 2004. Vol. 1: 42–71.
4. Qing W., C. Cole, M. Spiriyagin, Y.Q. Sun. 2014. „A review of dynamics modelling of friction wedge suspensions”. *Vehicle System Dynamics* 52 (11): 1389–1415, DOI: 10.1080/00423114.2014.943249;
5. Butler D.J., D.G. Brasher. 2012. „Explosion welding high temperature and wear resistant metal liners into 25mm gun barrels”. *Materials and Manufacturing Processes* 27: 888–891.
6. Blazynsky T.Z. 1983. *Explosive forming welding and compaction*. Applied Science Publishers LTD.
7. Manikandan P., K. Hokamoto, M. Fujita, K. Raghukandan, R. Tomoshige. 2008. „Control of energetic conditions by employing interlayer of different thickness for explosive welding of titanium-304 stainless steel”. *Journal of Materials Processing Technology* 195: 232–240.
8. Saravanan S., K. Raghukandan. 2012. „Thermal kinetics in explosive cladding of dissimilar metals”. *Science and Technology of Welding and Joining* 17 (2): 99–103.
9. Akbari Mousavi S.A.A., P. Farhadi Sartangi. 2009. „Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel”. *Materials and Design* 30: 459–468.
10. Saravanan S., K. Raghukandan. 2013. „Influence of Interlayer in Explosive Cladding of Dissimilar Metals”. *Materials and Manufacturing Processes* 28: 589–594.
11. Shapoval A.A., Mos'pan, D.V. & Dragobetskii, V.V. 2016. „Ensuring High Performance Characteristics For Explosion-Welded Bimetals”. *Metallurgist* 60 (3): 313–317. DOI: 10.1007/S11015-016-0292-9.