ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1990

Seria: TRANSPORT z. 15 Nr kol. 1094

Andrzej MARANDA, Jerzy NOWACZEWSKI
Bogdan ZYGMUNT
Wojskowa Akademia Techniczna

Henryk DYJA
Politechnika Częstochowska

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA METOD WYBUCHOWYCH DO ZWIĘKSZANIA TRWAŁOŚCI SZYN

Streszczenie. W pracy przedstawiono przegląd danych literaturowych dotyczących wybuchowego umacniania stali. Na ich podstawie oraz własnych doświadczeniach przeprowadzono analizę możliwości zastosowania w krajowym przemyśle wybuchowych metod zwiększenia trwałości szyn.

1. Wprowadzenie

Nowoczesna technika końca XX wieku dysponuje szerokim arsenałem środków oddziaływania na materię. W poszukiwaniu nowych technologii obróbki metali sięgnięto również do metod wykorzystujących energię wybuchu. Przy użyciu materiałów wybuchowych (MW) można uzyskiwać ciśnienia rzędu setek tysięcy, a nawet milionów atmosfer. Tak wysokie ciśnienia stwarzają specyficzne warunki odkształcania metali i pozwalają na uzyskiwanie różnych kompozycji, których otrzymanie w inny sposób jest niemożliwe. Ponadto w tak ekstremalnych warunkach istnieją szersze niż w metodach tradycyjnych możliwości zmian własności fizykochemicznych obciążanych tworzyw.

Proces wybuchowego umacniania metali istotnie różni się od utwardzania innymi metodami dynamicznymi i statystycznymi. Różnica ta wynika przede wszystkim z falowego charakteru rozprzestrzeniania się zaburzenia w obrabianym metalu, z krótkotrwałości procesu 10^{-6} - 10^{-9} s i z faktu występowania wysokich ciśnień przekraczających 10-500 razy granicę plastyczności metalu. Podstawową zaletą metody wybuchowej polega na tym, że powierzchniowe umacnianie różnych detali (niekiedy o złożonym kształcie) może być realizowane szybko, stosunkowo tanio i bez stosowania specjalnego oprzyrządowania.

W niniejszym referacie przedstawiono przegląd danych literaturowych dotyczących wybuchowego umacniania stali oraz analizę możliwości zasto-

sowania tej metody w krajowym przemyśle do zwiększania trwałości szyn.

2. Przegląd danych literaturowych

Pierwsze wyniki badań dotyczących wpływu detonacji materiałów wybuchowych (MW) na niskowęglową stal zostały opublikowane przez amerykańskich badaczy już w latach dwudziestych [1, 2]. W Stanach Zjednoczonych powstał międzyresortowy komitet, którego zadaniem było określić oddziaływanie detonacji skondensowanych MW na metalowe konstrukcje. Doświadczenia prowadzono na krążkach z niskowęglowej stali o średnicy 36 mm i grubości 6 mm. Zbadano szereg nitroglicerynowych materiałów wybuchowych o prędkości detonacji 1523, 2296, 3190, 4479 i 5716 m/s. Stosowano ładunki o masie 50 g i średnicy 36 mm. W celu wyjaśnienia zakresu wpływu wybuchu na stal prowadzono specjalne eksperymenty, w których między materiałem wybuchowym a obciążoną próbką pozostawiano dystans od 4 mm do 128 mm. Po wybuchowym obciążeniu badano mikrostukturę, w której zwracano głównie uwagę na analizę linii bliźniakowania - które autorzy uważali za podstawowy objaw wpływu materiału wybuchowego na metal. Autorzy próbowali określić związek pomiędzy ilością i konfiguracją linii bliźniakowania i parametrami MW, jednak nie uzyskali jednoznacznych danych.

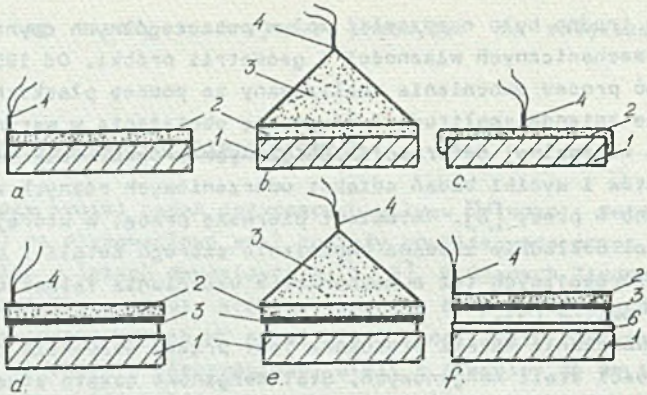
W latach czterdziestych zostały opublikowane prace naukowców angielskich poświęcone różnym aspektom problemu obciążania metali wybuchem. W pracy Cooka [3] opisano proces grawerowania obrazów na metalach za pomocą fal uderzeniowych i przedstawiono konstrukcje generatora płaskiej fali z MW o różnych prędkościach detonacji, który jest aktualnie bardzo szeroko stosowany. W pracy [4] Pack, Evans i James przedstawili wyniki badań wybuchu MW na powierzchni stali i ołowiu. Autorzy ocenili wartości kontaktowych ciśnień i zrobili jedną z pierwszych prób wykreślenia adiabaty uderzeniowej tych materiałów. W tym samym 1948 roku została opublikowana praca Carringtona i Gaylera [5] o zderzeniu cylindrów z różnych materiałów ze stalową płytą. Autorzy stwierdzili występowanie bliźniakowania w niskowęglowej stali, odkryli zakres stałej twardości, charakterystyczny dla badanego znacznie później odwracalnego przejścia fazowego. W latach 1951-1952 Mc Leod [6] pierwszy przedstawił możliwość wybuchowego umocnienia stali wysokomanganowej. W 1954 roku została opublikowana monografia Pearsona i Rineharta [7] zawierająca przegląd uzyskanych do tego czasu, wyników badań obróbki metali wybuchem. Z oryginalnych wyników autorów [7] należy podkreślić eksperymenty dotyczące wpływu detonacji cylindrycznych ładunków MW na grubościenne metalowe cylindry, jak również inne prace. Jest charakterystyczne, że we wszystkich pracach dotyczących wybuchowego umacniania opublikowanych do roku 1958 pokreślano oddziaływanie silnych fal uderzeniowych na umacnianie próbki prowadzące do ich deformacji, często je niszczącej. Przy takim sposobie prowadzenia ekspe-

rymentów bardzo trudno było rozdzielić wpływ poszczególnych czynników na końcową zmianę mechanicznych własności i geometrii próbki. Od 1956 roku rozpoczęto badać proces umocnienia realizowany za pomocą płaskich fal uderzeniowych ze zmienną amplitudą i długością obciążenia w warunkach prowadzących do minimalnej deformacji obciążanych próbek. Opis techniki tych eksperymentów i wyniki badań adiabat uderzeniowych różnych materiałów przedstawiono w pracy [8]. Natomiast pierwszą pracą, w której za pomocą płaskich fal dokładnie zbadano umocnienie szeregu metali i przedstawiono szereg interesujących tez o mechanizmie umacniania falami uderzeniowymi była praca Smitha [9].

Wybuchowe utwardzanie metali stosowane jest przede wszystkim do polepszenia właściwości stali manganowych. Stal manganowa często stosowana jest w tych przypadkach, kiedy element poddawany jest silnym uderzeniom i ścieraniu. Do przykładów takich detali zaliczane są krzyżownice rozjazdów kolejowych, szczęki kruszarek kamieni, części młynów, czerpaki koparek, młoty kruszące, a także różnego typu czopy i tuleje. W tych przypadkach uderzenia prowadzą do wzrastającego zużycia i deformacji części, przy czym plastycznie odkształcany obszar części utwardza się i zaczyna lepiej przeciwstawiać się dalszemu odkształceniu. Jednak, w większości praktycznych przypadków, to utwardzanie odkształceniowe zachodzi tylko w warstwie powierzchniowej. Ogólnie znana technologia całkowitego utwardzania takich elementów przed ich eksploatowaniem, jak wiadomo, jest zbyt droga i do tej pory nie gwarantuje pełnego wykorzystania możliwości utwardzanego metalu. Badania poszukiwawcze (innych metod) prowadzone przez firmę Du Pont wykazały, że głębsze utwardzanie bez zauważalnych zmian wymiarów detali osiągnięto na drodze detonacji MW w kontakcie z metalem. Utwardzanie wybuchowe na skalę doświadczalną i przemysłową realizuje się za pomocą detonacji cienkiej warstwy MW w kontakcie z powierzchnią umacnianego metalu lub na płytce znajdującej się w odpowiedniej odległości od niej. Na rys. 1 pokazano różne układy do wybuchowego umacniania.

Utwardzanie wybuchowe na skalę przemysłową zwykle realizuje się za pomocą detonacji cienkiej warstwy plastycznego materiału wybuchowego (MW) w kontakcie z powierzchnią utwardzanego metalu [10]. Ta powierzchnia może obejmować niewielki fragment powierzchni wyrobu lub większy obszar. Wybuchowe umacnianie zwiększa twardość zarówno na powierzchni metalu, jak i w jego wnętrzu. Dzięki temu wzrasta granica plastyczności i granica wytrzymałości na rozciąganie, detal wykazuje większą odporność na zużycie przy uderzeniach i mniej się odkształca. Wpływ wybuchowego utwardzania na właściwości próbki ze stali manganowej o wymiarach 3,2 x 12,7 x 76,2 mm charakteryzują dane w tablicy 1.

W niektórych przypadkach aby zwiększyć twardość i zmniejszyć wpływ odłupania można zastosować wielokrotną obróbkę. Na rys. 2 pokazano wykresy zależności twardości od głębokości dla stali manganowej poddanej jedno-, dwu- i trzykrotnej obróbce.



Rys. 1. Schematy układów do umacniania wybuchowego

a, c - bezpośrednio falą skośną, b - bezpośrednio falą płaską, d - falą skośną do miotanej płyty, e - falą płaską od miotanej płyty, f - falą skośną z powierzchni utwardzanej

1 - płyta umacniana, 2 - warstwa MW, 3 - generator fali płaskiej, 4 - zapalnik, 5 - płyta napędzana, 6 - warstwa ochronna

Fig. 1. Schemata of explosive hardening systems

a, c - direct skew wave, b - direct flat wave, d - skew wave of thrown plate, e - flat wave of thrown plate, f - skew wave on the hardened surface

1 - hardened plate, 2 - layer of explosive, 3 - flat wave generator, 4 - detonator, 5 - moving layer, 6 - resistance layer

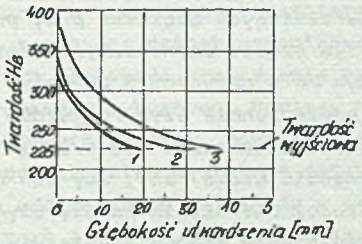
Tablica 1

Wpływ wybuchowego utwardzania na właściwości stali manganowej

Charakterystyka		Przed obróbką	Po wybuchowej obróbce
Twardość wg Brinella		200	370
Granica plastyczności	[MPa]	410	890
Granica wytrzymałości na rozciąganie	[MPa]	940	1280
Wydłużenie przy rozciąganiu (na długość 25 mm)	[%]	48	37
Przewężenie poprzeczne	[%]	40	40

Przy początkowej twardości według Brinella 225 HB, twardość na powierzchni w wyniku tej obróbki wzrosła odpowiednio do 320, 360 i 385.

Podczas utwardzania z wykorzystaniem szczególnie wysokich ciśnień zgodnie z oczekiwaniami występuje niewielki zgniot powierzchni w obszarze obróbki. Jednak dzięki odpowiednim zabiegom i kontroli ich efektów można go ograniczyć do minimum, tak że gotowe wyroby nie będą wymagały z tego powodu mechanicznej obróbki.

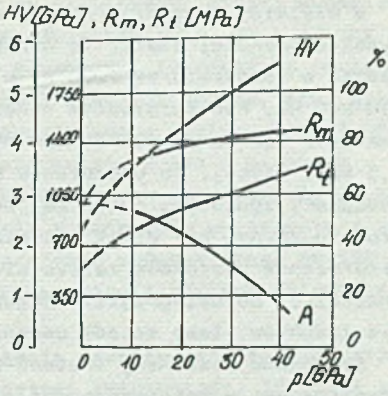


Rys. 2. Wpływ krotności umacniania na twardość i głębokość utwardzania

1 - jednokrotne, 2 - dwukrotne, 3 - trzykrotne

Fig. 2. Effect of multiplication factor of the hardening process on the hardness and the hardening depth

1 - once fold, 2 - two fold, 3 - three fold



Rys. 3. Zależność twardości HV wytrzymałości na rozerwanie R_m, wytrzymałości na pełzanie R_t i wydłużenia A od ciśnienia w fali uderzeniowej działającej na metal

Fig. 3. A dependence of the hardness (HV), tensile strength (R_m) the creep strength (R_t) and the elongation (A) on the pressure of the shock wave acting on the metall

W pracy [14] zbadano umocnienie stali G-13 za pomocą skośnych fal generowanych zderzeniami płyty, a także nakładanymi ładunkami plastycznego MW o parametrach zbliżonych do Hx-75. Na rys. 3 przedstawiono krzywe zależności twardości od odległości od powierzchni utwardzanej dla różnych ciśnień w skośnej fali. W pracy [15] stal G-13-L obrabiano stosując fale ślizgające się o ciśnieniu 33 000, 37 000 i 47 000 MPa i mierzono naprężenia szczątkowe pod powierzchnią. Okazało się, że naprężenia te są rozciągające i specjalne badania wykazały, że to szczególnie wpływa na wydłużenie okresu pracy takich wyrobów, jak dziobnice krzyżownic poddawanych przemiennym obciążeniom. Podczas umocnienia tych wyrobów nagniataniem rolką może być osiągnięta również wysoka twardość, ale głębokość umocnienia jest niewielka (około 10 mm). Naprężenia szczątkowe, będąc ściskającymi prowadzą do szybszego pękania wyrobu niż przy nieutwardzonej dziobnicy.

Firma Du Pont posiada przemysłowe stanowiska do umacniania wybuchem zwłaszcza odlewów ze stali austenitycznej manganowej, stosowanych w maszynach budowlanych i drogowych (zęby łyżek koparek, części kruszarek kamieni), w maszynach górniczych (zęby frezów wiertnic) oraz w transporcie kolejowym (zwrotnice i krzyżownice rozjazdów). Według danych tej firmy [16] zużycie stopy gąsienicy buldożera umocnionej wybuchowo zmniejszyło się o 40%, a czas pracy zwrotnic rozjazdów zwiększył się o 30%. Główny dostawca stali manganowej w USA od 1957 roku prowadzi wybuchowe utwardzanie odlewanych części torowych.

W Wielkiej Brytanii również umacnia się wybuchem elementy rozjazdów z wysokomanganowej stali. Te wyroby stosowano wcześniej po zahartowaniu w wodzie w temperaturze 1050°C, w wyniku czego ich twardość wynosiła 190-200 HB. Pod działaniem okresowych uderzeniowych obciążeń przy pracy twardość ich wzrastała do 450 HB, ale w tym czasie szyna zużywała się o 1,5 mm i więcej. Po umocnieniu plastycznym MW o grubości 3 mm metal był poddawany zgniotowi o 0,6 mm, przy czym powierzchnia szyn rozjazdów pozostawała równa, bez oznak zużycia, a trwałość zwiększała się o 300% 16 Utwardzanie rozjazdów zaleca się przeprowadzić kilka razy, aby ich nie zniszczyć. Do osiągnięcia końcowej głębokości umocnienia należy użyć 3-4 ładunków. Taką metodę umacniania stosują duże kampania kolejowe USA

Stosowana wcześniej śrutowo-strumieniowa obróbka części maszyn z austenitycznej wysokomanganowej stali, pracujących w warunkach zmiennych naprężeń, pozwalała uzyskać cienką utwardzoną warstwę grubości 0,2-0,4 mm. Umocnienie wybuchem stali o wyjściowej twardości 200-250 HB pozwoliło zwiększyć twardość powierzchniową warstwy do 450 HB. Niemałe znaczenie ma również to stwierdzenie, że na głębokość 12 mm od powierzchni utwardzanej twardość wynosiła 300 HB [7]. Zmiany mechanicznych właściwości stali manganowej, badane w zależności od przyłożonego ciśnienia 16 przedstawiono na rys. 3.

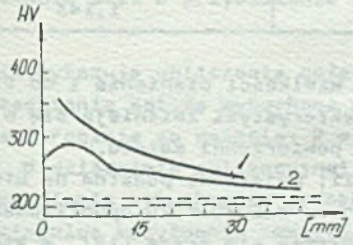
Badania umacniania odlewów i odkuwek ze staliwa Hadfielda są prowadzone również od 1959 roku we Francji, w Czechosłowacji i innych krajach [7] Umacnianie wybuchem wyrobów metalowych w USA jest realizowane z reguły za pomocą plastycznego MW o prędkości detonacji 6700-7300 m/s, produkowanego w postaci warstw o różnej grubości. Łatwo go można kroić, jest wodoodporny i przyjmuje kształt umacnianego elementu.

W Związku Radzieckim badania nad umacnianiem wysokomanganowej stali rozpoczął w 1960 roku Instytut Hydrodynamiki w Nowosybirsku, wspólnie z Nowosybirskimi Zakładami Kolejowymi. Pierwsze informacje były opublikowane w pracy [10]. Badania nad obciążeniem wysokomanganowej stali G-13 bezpośrednim wybuchem różnych MW wykazały, że podczas wybuchu amonitu twardość stali wzrosła z 270-290 do 330-360 HB, podczas obciążenia heksogenem (Hx) do 420-450 HB, a podczas wybuchu ładunku TNT/Hx = 50 : 50 do 500--580 HB.

Doświadczalne dane pozwalają wysunąć wniosek, że wzrost wysokości ładunku MW nieznacznie wpływa na wartość powierzchni twardości, rośnie przy tym głębokość zgniotu. Porównanie mechanicznych właściwości dziobnic krzyżownic rozjazdów utwardzanych wybuchem, nagniatanych rolką, a także w procesie eksploatacji wykazało, że utwardzanie falami uderzeniowymi zwiększa głębokość warstwy umocnionej i zwiększa granicę wytrzymałości na rozrywanie więcej niż 1,5 razy. Próbki w kształcie litery T odlewane ze stali G-13 poddawano umocnieniu różnymi metodami [15]. Ciśnienie fali uderzeniowej w zależności od wysokości ładunku i szybkości miotania blachy w próbkach wynosiły: 33, 37 i 47 GPa. Mechaniczne utwardzanie realizowano nagniataniem rolkami przy nacisku na rolkę 80 kN. Na rys. 5 przedstawiono

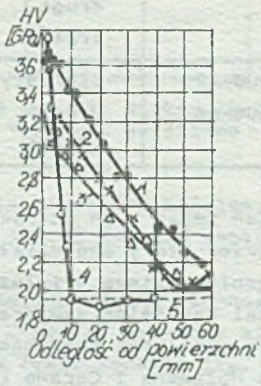
rozkład twardości w głąb próbki. Twardość na powierzchni próbki wynosiła 294, 333 i 375 HB przy ciśnieniu zderzenia odpowiednio 33, 39 i 47 GPa. Próbki utwardzały się praktycznie na całą głębokość. Twardość na powierzchni próbek utwardzanych nagniataniem rolkami wynosiła 380 HB, tzn. była równa twardości próbek umacnianych falą uderzeniową o amplitudzie 47 GPa. Przy tym głębokość utwardzania była znacznie mniejsza niż w próbkach utwardzanych wybuchowo. Pomiary naprężeń szczątkowych doprowadziły do interesujących wyników. Okazało się, że jeżeli w materiale wyjściowym i po utwardzeniu rolką występują ściskające naprężenia końcowe około 50-120 MPa to po uderzeniowym ściskaniu w stali G-13L naprężenia końcowe zmieniają swój znak i stają się rozciągającymi.

Badania zmęczeniowe wykazały, że naprężenia rozciągające są korzystne i znacznie (1,5-2 razy) zwiększają wytrzymałość zmęczeniową. Istnieją zatem dane świadczące o możliwości zwiększenia trwałości eksploatacyjnej rozjazdów kolejowych w wyniku utwardzania wybuchowego stali G-13-L. Stwierdzono, że w rozjazdach utwardzonych wybuchem wyraźnie zmniejszyły się przypadki stykowo-zmęczeniowych wykruszeń i spękań na powierzchni tłoczenia.



Rys. 4. Umacnianie stali G-13 za pomocą fal uderzeniowych generowanych przez napędzaną płytę 1 lub nakładane ładunki plastycznego MW 2 [11]

Fig. 4. A hardening of a steel grade G-13 by means: 1 - a shock wave generated by a driven plate 2 - superimposing of a plastic charge explosive



Rys. 5. Twardość stali G-13 umacnianej różnymi metodami w funkcji odległości od powierzchni próbki

1 - fala 47 GPa, 2 - fala 39 GPa, 3 - fala 33 GPa, 4 - nagniatanie rolkami, 5 - twardość wyjściowa [15]

Fig. 5. A hardness of G-13 steel hardened by different methods in relation from the distance of the specimen surface

1 - wave 47 GPa, 2 - wave 39 GPa, 3 - wave 33 GPa, 4 - burnishing by the rolls, 5 - initial hardness

W tablicy 2 przytoczono dane o zgniocie powierzchni dla stali manganowej poddawanej utwardzaniu kolejnymi wybuchami. Przedstawione w tej tablicy MW typu EL-506-A2 i EL-506-A4 stanowią elastyczne arkusze z pentrytu o masie 0,31 i 0,62 g/cm^2. W całym obszarze działania ładunku MW, detonowanego w kontakcie z metalem, następuje wstępne zwiększenie granicznej plastyczności i granicy wytrzymałości, a zmniejszenie plastyczności metalu.

Tablica 2

Średni zgniot powierzchni stali manganowej utwardzanej wybuchem

MW	Numer wybuchu	Średni zgniot powierzchni z 4 odczytów [mm]	Sumaryczne odkształcenie [mm]
EL-506-A2	pierwszy	0,254	0,254
	drugi	0,203	0,457
	trzeci	0,127	0,584
EL-506-A4	pierwszy	0,508	0,508
	drugi	0,508	1,016
	trzeci	0,381	1,397
EL-506-A2	pierwszy	0,254	0,254
EL-506-A4	drugi	0,508	0,762
	trzeci	0,381	1,143

Stopień zmian tych charakterystyk zależy od wielkości ciśnienia i od czasu, przez który ono działa. Najsilniej charakterystyki zmieniają się w otoczeniu miejsca przyłożenia obciążenia do powierzchni metalu.

Stal Hadfielda zawierająca 13% Mn jest [11] wyjątkowo podatna na utwardzanie wszelkimi sposobami, również i wybuchem. W 1960 roku opublikowano pracę Holzmana i Corana [10], w 1970 roku pojawia się praca [12], w której przedstawiono badania uderzeniowo-falowej obróbki stali Hadfielda. W pracy [10] zbadano zależności twardości, pełzania, wytrzymałości i wydłużenia od ciśnienia w fali uderzeniowej w obszarze 8000-20000 MPa. Na rys. 4 przedstawiono te zależności, a także dane uzyskane w badaniach T.M. Sobolenki w Instytucie Hydrodynamiki w Nowosybirsku [13] i wyniki eksperymentów opublikowanych w [12]. Porównanie z walcowaniem na zimno [10] wykazało, że przy umacnianiu do tego samego poziomu twardości, próbki po uderzeniowym obciążeniu mają większą ciągliwość. Badając wpływ czasu trwania impulsu na końcową twardość [12], można stwierdzić, że podczas zwiększania czasu obciążania od 0,065 do 2,2 μs twardość znacznie rośnie, zwłaszcza w obszarze ciśnień do 1000 MPa (tablica 3).

Wykorzystanie skośnych fal w umocnieniu stali Hadfielda, to w gospodarce narodowej najważniejsze zastosowanie procesu umacniania wybuchowego

metali. Na skalę przemysłową utwardzanie różnych części np. dziobnic krzyżownic w rozjazdach kolejowych, zębów łyżek koparek itp., przeprowadza się za pomocą nakładanych ładunków dostatecznie silnego MW.

Tablica 3

Wpływ długości impulsu na umacnianie stali Hadfielda [12]

Fale uderzeniowe od MW*		Długość impulsu 2,2 μs		Długość impulsu 0,23 μs		Długość impulsu 0,065 μs	
Ciśnienie [MPa]	Twardość HV	Ciśnienie [MPa]	Twardość HV	Ciśnienie [MPa]	Twardość HV	Ciśnienie [MPa]	Twardość HV
4500	245	500	192	1400	187	2900	175
4500	235	1820	215	1450	210	3500	187
12500	331	1980	215	4950	211	5400	202
18000	370	2000	211	4950	212	5700	202
18000	380	3210	225	7000	241	10500	219
28000	394	3750	239				
28000	392	4120	236				
28000	403	4120	236				
39500	415	4120	233				
48100	465	4800	262				

*$p < 200$ kbar; długość impulsu wynosiła około 2 μs. Dla większych ciśnień impuls miał w przybliżeniu kształt trójkątny. Twardość wyjściowa - 175 HV

Jak wykazują obliczenia opłacalności użytkowania rozjazdów kolejowych, umacnianie metodą wybuchową nawet do twardości 320 HB pozwala zaoszczędzić rocznie co najmniej 2 mln rubli.

W dziedzinie aplikacyjnej opracowań stworzono i wdrożono technologię umacniania wybuchowego wysokomanganowej stali, z której wytwarza się dziobnice krzyżownic rozjazdów kolejowych, zęby łyżek koparek itp. [17]. Wykazano, że proces umacniania wybuchowego ma perspektywy w różnych dziedzinach techniki. Do obecnej chwili podczas umacniania stosuje się ładunki kontaktowe z plastycznych MW o prędkości detonacji w granicach 7-8 km/s przy gęstości 1,5 g/cm^3. W tych warunkach ciśnienie na froncie fali detonacyjnej wynosi $p \approx 20\,000$ MPa i w zależności od sposobu inicjowania detonacji w utwardzanym metalu generuje się fala uderzeniowa o ciśnieniu na froncie 20 000 - 40 000 MPa. Rozprzestrzenianie tej fali w metalu powoduje wzrost jego twardości, zwiększenie granicy wytrzymałości na rozerwanie i granicy plastyczności, zmniejszenie udarności i wydłużenia.

Stosowanie silnych plastycznych MW, zapewniających znaczny efekt umocnienia, nie zawsze jest korzystne pod względem ekonomicznym. W ostatnich latach sformułowano obiecującą koncepcję stosowania pośredniej warstwy porowatego materiału między MW i powierzchnią umacnianą. Jeżeli podczas

rozprzestrzeniania się detonacji wzdłuż ładunku w porowatym materiale generuje się fala machowska, to zaryscowuje się możliwość zastosowania do umacniania niskoimpulsowych tanich materiałów wybuchowych.

Na początku lat siedemdziesiątych do technologii wybuchowego umacniania metali zaproponowano wprowadzenie istotnego uzupełnienia. Przegląd pierwszych badań prowadzonych w tym kierunku zaprezentowano w [11]. Jak przedstawiono wyżej, działanie fali uderzeniowej zwiększa twardość i zmniejsza plastyczność. Przyczyna zmian charakterystyk mechanicznych leży w nasyceniu objętości obrabianego materiału defektami struktury krystalicznej. Aby uniknąć obniżenia plastyczności, po działaniu fali uderzeniowej zaproponowano poddać materiał specjalnej obróbce termicznej w celu uzyskania struktury drobnoziarnistej, ponieważ wówczas defekty powinny stać się zarodkami równych ziaren i powinny zapewnić zwiększenie plastyczności oraz udarności w niskich temperaturach. Dla wysokomanganowej stali obróbka termiczna odpowiada odpuszczeniu rekrystalizacyjnemu w temperaturze 1050°C.

Mechaniczne właściwości po wybuchowo-termicznej obróbce pokazano w tablicy 4. Badania mikrostruktury wykazują, że rozmiary ziaren zmniejszają się w przybliżeniu 10-krotnym. Wybuchowo-termiczna obróbka pozwala optymalizować mechaniczne właściwości wysokomanganowej stali i otrzymywać znacznie korzystniejsze cechy eksploatacyjne obrabianych wyrobów.

Tablica 4

Zmiany mechanicznych charakterystyk materiału umacnianego w różnych warunkach

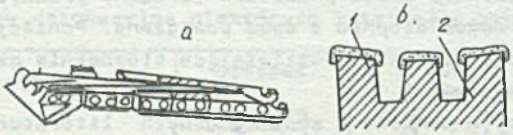
Stan	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]		Wydłużenie [%]		Twardość HV	Udarność przy T°C [MJ/m²]	
	σ_R	$\delta_{0,2}$	δ	Ψ		~20	~100
Wyjściowa	875	435	36	33	200	2,7	0,6
p=20 GPa	1025	730	31	28	390	19,0	0,5
jw. hartowanie w wodzie o temp.1050°C	975	475	46	31	240	2,7	1,8

Wyniki badań dotyczących wybuchowo-termicznej obróbki przedstawiono również w pracach [18-19]. Martynow ze współpracownikami [18] prowadzili badania ze stalami St3, St10 i St45 oraz żelazem o technicznej czystości. Próbki o średnicy 20 mm i długości 60 mm poddawali ciśnieniu 20 GPa, a następnie wygrzewali w zakresie temperatur 150-500°C przez dwie godziny. W rezultacie badań stwierdzili, że wygrzewanie można prowadzić do podwyższenia twardości stalowych próbek. Tak np. twardość próbki ze stali St10 od wyjściowej 118 HB zwiększyła się do 217 HB po obciążeniu falą uderze-

niową o intensywności 20 GPa, a po dodatkowym ogrzewaniu w temperaturze 350°C do 255 HB. W przypadku stali St3 analogiczna wartość twardości wynosiła 128, 262 i 287 HB, a dla stali St45 156, 311 i 364 HB. Nie stwierdzono podwyższenia twardości w czystym żelazie.

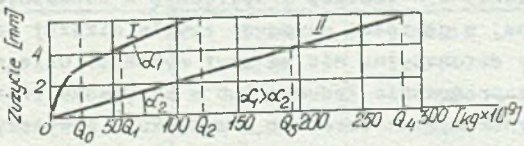
Autorzy pracy uzyskany efekt tłumaczyli dysocjacją perlitu i zwiększeniu się rozpuszczalności węgla w żelazie. W tej pracy 18 również stwierdzono, że twardość wzrasta wraz z powtarzaniem się ilości cyklu uderzeniowo-termicznego procesu. Po trzecim cyklu przyrost twardości był wyższy o 10-30% w porównaniu z pierwszym cyklem.

Dotychczas została rozpracowana technologia umacniania dziobnic krzyżownic rozjazdów kolejowych. Na rys. 6 przedstawiono schemat układu utwardzania jednego z typów krzyżownic. W tym przypadku pobudza się jednocześnie trzy ładunki rozłożone na powierzchni podlegających maksymalnemu zużyciu podczas eksploatacyjnych obciążeń ("przeskakiwanie" koła z jednej powierzchni na drugą). Na początku użytkowania główną rolę odgrywa proces odkształcania plastycznego wywołującego szybkie zmniejszenie wysokości powierzchni tłoczenia. W dalszej kolejności następuje umocnienie powierzchni tłoczenia i główną rolę w zużyciu zaczynają odgrywać procesy ścierania (rys. 7). Umacnianie wybuchowe pozwala wyeliminować początkową strefę zgniatania i znacznie zwiększyć okres pracy dziobnicy. Uzyskanie korzyści szczególnie istotnie zależą od jakości metalu i jakości konkretnego odlewu. W warunkach nowosybirskich Zakładów Kolejowych osiągnięto wzrost trwałości eksploatacyjnej dziobnic 1,5-2 razy.



Rys. 6. Schemat umacniania krzyżownicy kolejowej
a - krzyżownica; b - rozmieszczenie ładunków: 1 - ładunek MW, 2 - krzyżownica [17]

Fig. 6. The scheme of the strengthening of the grog
a - the frog; b - an arrangement of explosive charges: 1 - charges of high explosives, 2 - the frog



Rys. 7. Charakter zmian zużycia dziobnicy nieutwardzonej I i po umocnieniu II
Q - masa ładunku przeniesionego przez krzyżownicę [17]

Fig. 7. The charakter of the frog abbrasive wear before (I) and after (II) the explosive strengthening

Badania nad wybuchowym umacnianiem metali prowadzone były również w Polsce, a ich rezultaty pokazano między innymi w publikacjach [20-23].

3. Możliwości stosowania w krajowym przemyśle wybuchowej metody umacniania szyn

Termin - materiał wybuchowy i wybuch kojarzy się przeciętnemu człowiekowi, a niestety również inżynierowi lub technikowi, z nieokiełznaną, niszczącą siłą powodującą destrukcyjne zmiany w środowisku. Ugruntowanie się takiej opinii spowodowane było dotychczasowymi zastosowaniami materiałów wybuchowych głównie w technice militarnej oraz w górnictwie, gdzie niszczące oddziaływanie wybuchu na obiekty inżynieryjne, budowle lub złoża skalne było czynnością zaprogramowaną. W świadomości ludzi tkwi również głęboko obraz zniszczeń wojennych, w których energia uwalniająca się w czasie ma główny udział. Podobnie ekscytujące są wiadomości o tragicznych w skutkach wybuchach w kopalniach, zakładach przemysłowych, a także nawet w budynkach mieszkalnych z instalacją gazu ziemnego.

Tak scharakteryzowany wizerunek materiałów wybuchowych, który funkcjonuje również w świadomości kadry technicznej oraz w kręgach administracyjno-decyzyjnych jest poważnym hamulcem rozwoju nowych technologii, gdzie materiał wybuchowy spełnia rolę źródła energii o bardzo wysokiej intensywności. Oczywiście można stwierdzić, że obiekcje wymienionych grup zawodowych są częściowo uzasadnione ponieważ stosowanie materiałów wybuchowych wiąże się z rozwiązaniem wielu problemów formalno-prawnych i technicznych, które są w bardzo dużym stopniu z sobą powiązane. Poniżej rozpatrzono wszystkie podstawowe elementy umożliwiające stosowanie materiałów wybuchowych do umacniania szyn.

Z przedstawionej w punkcie 2 analizy danych literaturowych wynika, że znaczne umocnienie stali następuje gdy ciśnienie w fali uderzeniowej obciążającej tworzywo mieści się w zakresie 13-30 GPa. A więc najistotniejszym parametrem MW stosowanych w wybuchowej obróbce jest ciśnienie detonacji, które w większości materiałów wybuchowych, jest proporcjonalne do prędkości detonacji i zależy od gęstości ładunku. W tablicy 5 zestawiono parametry detonacyjne MW produkowanych przez krajowy przemysł.

Jednak MW wymienione w tablicy 5 występują w normalnych warunkach w postaci krystalicznej o gęstości usypowej zwykle niższej od 1,0 g/cm^3, a zatem ich parametry detonacyjne nie są zbyt wysokie. Osiągnięcie wysokich gęstości wymaga zaprasowania ładunku lub w przypadku trotylu stopienia. Wiąże się to ze znacznymi kosztami i w związku z powyższym do wybuchowego utwardzania na skalę większą niż laboratoryjna wymienione MW nie nadają się.

W wybuchowym umacnianiu metali stosuje się najczęściej MW w postaci arkuszy lub wstążek. Dlatego też istotnym technicznym problemem wiążącym się z doborem odpowiedniego MW jest jego poręczność w stosowaniu. Należy

dążyć w takim kierunku, aby używany MW dawał się łatwo formować w potrzebne warstwy, których grubość można byłoby zmieniać oraz posiadał określoną wytrzymałość mechaniczną umożliwiającą swobodne przenoszenie, a jednocześnie ściśle przylegał do obciążanego tworzywa czy napędzanej blachy. Spośród MW o różnej postaci fizycznej powyższe warunki najlepiej spełniają materiały plastyczne. Aktualnie MW plastyczne nie są ujęte w "Katalogu górniczych środków strzałowych". Jednak pierwsze próby prowadzone w Wojskowej Akademii Technicznej w kooperacji z ZTS "Pronit" w Pionkach i ZTS "Nitron" w Krupskim Młynie wykazały, że w przypadku skonkretyzowania wielkości zamówienia oraz form ładunków mogą być one w odpowiedniej ilości produkowane w wyżej wymienionych zakładach.

Drugim istotnym problemem jest miejsce prowadzenia wybuchowego umacniania. Ze względu na konieczność datonowania stosunkowo dużych ilości (od kilku do kilidzziesięciu kilogramów) materiału wybuchowego odpada możliwość prowadzenia tej operacji na terenie zakładu wytwyrzającego szyny. Należy ją prowadzić w miejscach, gdzie będzie zapewniony brak szkodliwego oddziaływania fali sejsmicznej i uderzeniowej propagującej się w powietrzu na różnego typu obiekty oraz ludzi. Wydaje się, że najlepszym rozwiązaniem byłaby realizacja wybuchowego umacniania szyn na terenie zakładów wydobywczych nie objętych prawem górniczym lub obecnie nieeksploatowanych. Na terenie województw katowickiego lub opolskiego znajduje się ich kilka i mogą być one z powodzeniem wykorzystane.

Tablica 5

Parametry detonacyjne niektórych materiałów wybuchowych

Lp.	Materiał wybuchowy	Gęstość [g/cm^3]	Prędkość detonacji [km/s]	Ciśnienie detonacji [GPa]
1	Trotyl łuskowany	1,59	6,91	17,80
		1,45	6,50	14,20
		1,00	5,00	6,60
2	Trotyl drobnokrystaliczny	1,60	6,50	18,50
		1,30	6,50	14,00
		1,00	5,60	7,8
3	Heksagen	1,60	8,13	26,00
		1,46	7,60	20,80
		1,29	7,00	16,40
		0,95	5,80	9,46
4	Pentryt flegmatyzowany	1,66	8,10	24,60
		1,51	7,42	18,70
		0,95	5,30	6,45

Również problemem jest kto mógłby w przyszłości wykonywać w skali przemysłowej utwardzanie wybuchowe szyn. W naszych warunkach możliwe są dwa rozwiązania: albo zespół składający się z odpowiednio wyszkolonych pracowników wytwórni szyn lub specjalistyczna instytucja, w której zakresie działalności byłyby wszelkiego rodzaju prace dotyczące stosowania MW poza przemysłem górniczym. W przypadku pierwszego rozwiązania należałoby z załogi danego zakładu wytypować kilka osób o odpowiednich predyspozycjach psychicznych i fizycznych a następnie przeszkolić. W zakresie ich obowiązków byłby również transport MW i zapalników z wytwórni do miejsca realizacji wybuchowej technologii. Tak więc w obrębie dotychczasowej działalności zakładu pojawiłby się nowy specyficzny element - całokształt prac z materiałami wybuchowymi. Biorąc pod uwagę wcześniej już opisane obiekcje kadry kierowniczej należałoby raczej dokładnie rozważyć drugie rozwiązanie.

Aktualnie (marzec 1989 r.) rozpoczęto wstępne rozmowy, których końcowym celem jest powołanie firmy psecjalizującej się w opracowaniu, wdrażaniu i prowadzeniu prac dotyczących wybuchowych metod obróbki metali. W skład spółki (proponowana nazwa "Metal-Explodex") wchodziłyby jednostki naukowe zajmujące się pracami aplikacyjnymi w dziedzinie wysokoenergetycznej obróbki tworzyw, wytwórnie materiałów wybuchowych oraz niektóre zakłady, w których wybuchowe metody byłyby w przyszłości stosowane. Przedsiębiorstwo "Metal-Explodex" byłoby odpowiedzialne za wykonanie prac strzałowych, a do wytwórni szyn byłby przekazywany umocniony wyrób. W ten sposób ilość osób mających styczność z materiałami wybuchowymi byłaby ograniczona oraz rozwiązane zagadnienia, wytwarzanie, składowanie i dystrybucja MW.

4. Wnioski końcowe

Obecna sytuacja gospodarcza kraju determinuje konieczność maksymalnego oszczędzania surowców i materiałów. Jedną z form realizacji takich zamierzeń jest również przedłużanie żywotności maszyn i urządzeń. Przedstawiony przegląd literatury oraz analiza możności stosowania metod wybuchowych do umacniania szyn w warunkach naszego przemysłu wykazały, że technologie wybuchowe powinny być rozwijane. Jednak w celu realizacji takiego zamierzenia należy przeprowadzić szereg prac teoretycznych, aplikacyjnych i dwdrożeniowych. Mimo wielu danych, brak jest w literaturze gotowego, kompleksowego rozwiązania umacniania elementów torowych i rozjazdowych. W związku z powyższym, w celu określenia optymalnych warunków prowadzenia procesu umacniania szyn należy przeprowadzić cykl eksperymentów, będących źródłem materiału do szczegółowych badań strukturalnych i obliczeń wytrzymałościowych. Wyniki tych badań stanowiłyby podstawę do opracowania i wdrożenia produkcji w wytwórni MW odpowiedniego typu ładunku

wybuchowego oraz wytypowania właściwego sposobu prowadzenia procesu dynamicznego obciążania. Następnie należałoby umocnić odpowiednią ilość elementów torowych i poddać je eksploatacji na wytypowanych odcinkach magistrali kolejowej. Wykonanie tego ostatniego, a jak ważnego odcinka pracy będzie wyłącznie możliwe przy pomocy Dyrekcji Utrzymania Kolei, na którą bardzo liczymy.

LITERATURA

[1] F.B. Foley, J.E. Crawshaw: Effect of air gap in explosive system on production on Naumann bands Trans. AIME, 1926, 73, 948.

[2] F.B. Foley, S.P. Howell: Neumann bonds and evidence of action of explosive on metals. Trans AIME 1923, 68, 891.

[3] J.A. Cook: Engraving of metal plates by means of explosive. Research, 1948, 1, 474.

[4] D.C. Pack, W.M. Evans, H.J. James: The propagation of shock waves in steel and Lead: Proc. Phys. Soc. 1948, 60, 337, 1.

[5] W.E. Carrington, M.L.V. Gayler: The use of flat-ended projectiles for determing dynamic yields stress. III Changes in microstructure caused by deformation under impact at high - striking velocities. Proc. Roy. Soc. 1948, 194, 1038, 323.

[6] N.A. Mc Leod: Method of hardening manganese steel. Pat. USA 2703297 March 1955.

[7] J. Pearson, J. Rinechart: Explosive working of metals. New York 1963.

[8] M.H. Rice, R.G. Mc Queen, J.M. Walsh: Compression of solids by strong shock waves. In. Solid State Physics. Vol. 6. New York-London Academic Press 1958.

[9] G.S. Smith: Metallographic studies of metal after explosive shock. Trans AIME 1958, 214, 574.

[10] A.H. Holtzman, G.R. Cowan: The strengthening of austenitic manganese steel by plane shock waves. Response of metals to high velocity deformation. N.Y-L. Interscience 1960.

[11] A.A. Deribas: Fizyka uprocnienija i svarki vzryvom. Moskva 1980.

[12] A.R. Champion, R.W. Rhode: Hugoniot equation of state and the effect of shock stres amplitude and duration on the hardness of Hadfield steel. J. Appl. Phys. 1970, 5.

[13] T.M. Sobolenko: Issledovanija uprocnienija niekotorych metalov posle vozdiejstvija vzryvnych nagruzok. Autoref. kand. dis. Novosybirsk, 1966, 12.

[14] Jr.S. Jenkins: Explosive impact Hardening of Manganese Steel. Pacific Northwest Metals and Minerals Conf. American Institute of Mining. Metalurgical and Petroleum Engineers, Portland kwiecień 1960.

[15] A.A. Astmov, V.L. Vlasov, K.I. Kozorezov i wsp.: O ostatočnych naprażenijach v stali G-13-L, upročniennoj udarnymi volnami. Fizika i chimija obrabotki materialov. 1968, 5.

[16] K.I. Kozorezov, N.F. Skugorova: Upročnienija stalej udarnymi volnami. Fizika i chimija obrabotki materialov 1969, 2.

[17] A.A. Deribas: Obrabotka materialov energiej vzryva. FGV 1987, 5.

[18] A.I. Martynov, V.F. Sazanov, V.K. Korobov, S.S. Bacanov: Vlianie udarno termičeskoj obrabotki na mechaničeskije svojstva stalej. FGV 1988, 24, 3, 94.

[19] A.I. Martynov, V.F. Sazonov, V.K. Korobov, S.S. Bacanov: Vlianie udarno termiceskoj obrabotki na mechaniceskije svojstva stalej. FGV 1988, 24, 3, 94.

[20] Z. Bojar, A. Maranda, J. Nowaczewski i inni: Umocnienie warstw wierzchnich stali konstrukcyjnych odkształconych wybuchowo. Biul. WAT 1988, 37, 10, 63.

[21] J. Nowyczewski, A. Maranda, B. Zygmunt: Wybuchowe umacnianie metali, Biul. WAT 1988, 37, 10, 109.

[22] A. Maranda, J. Nowaczewski, B. Zygmunt, H. Dyja: Wybuchowe umocnienie stali. Mat. Konf. Nauk-Techn. plastycznej metali. Częstochowa 1988.

[23] A. Maranda, J. Nowaczewski, B. Zygmunt, H. Dyja, T. Hatalak: Wybuchowe umacnianie elementów rozjazdów kolejowych. Drogi Kolejowe 1988, 21 (35), 8, 166.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Stanisław Tkaczyk

Wpłynęło do Redakcji w styczniu 1990

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ МЕТОДОВ К ПОВЫШЕНИЮ ПРОЧНОСТИ РЕЛЬСОВ

Р е з ю м е

В работе представлен обзор литературных данных по упрочнению стали взрывным способом. На основе этих данных, а также собственного опыта проведен анализ возможности применения взрывных методов повышения прочности рельсов в отечественной промышленности.

THE ANALYSIS OF THE USE OF EXPLOSIVE METHODS FOR AN INCREASE OF THE RAILS DURABILITY

S u m m a r y

In the work the literature surrvey relateded to the explosive hardening of steel has been presented. On the basis of the literature review and results of own research the possibility of an application of the explosive methods for an increase of rails durability was analyzed.