

## MODERNIZACJA STANOWISKA POMIAROWEGO Z MŁOTEM CHARPY'EGO

Józef PYSZKO

Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, Katedra nr 2

tel: 347 11 20, e-mail: ziuk@pg.gda.pl

**Streszczenie:** W artykule zaproponowano koncepcję modernizacji stanowiska do pomiaru udarności stali metodą Charpy'ego. Modernizacja ma na celu rejestrację siły w trakcie udaru i wyznaczenie strzałki ugięcia w momencie zerwania próbki. W pierwszych dwóch rozdziałach pokrótce opisano przyczyny pęknięcia stali w okolicy spoin i wynikającą stąd potrzebę badania jej udarności. W następnych dwóch opisano metodę modernizacji stanowiska i przedstawiono osprzęt pomiarowy służący temu celowi. Doraźne korzyści wynikające z modernizacji to zwiększenie dokładności wyznaczania udarności stali oraz wizualizacja próby laboratoryjnej dla celów dydaktycznych. Docelowe korzyści to uzyskanie wyników analizy matematycznej z przebiegu impulsu siły łamiącej próbkę w czasie udaru. Wyniki z próby udarowej i atest materiałowy stali stanowią będą komputerowe archiwum dla przyszłych ekspertyz porównawczych.

**Słowa kluczowe:** próba udarowa Charpy'ego, siła udaru, strzałka ugięcia, wahadło matematyczne.

### 1. WPROWADZENIE

Zasady technologii spawania opracowano pod koniec lat trzydziestych XX wieku. Pierwszy na świecie most spawany według projektu prof. S. Bryły zbudowano w roku 1928 na rzece Studwi w Maurzycach pod Łowiczem. Jednak przemysłowe zastosowanie połączeń spawanych konstrukcji stalowych przypada na okres trwania drugiej wojny światowej. Potrzeba chwili wymagała szybkiej i masowej produkcji floty towarowej na rzecz aprowizacji armii. Oprócz względów ekonomicznych spawanie miało tą przewagę nad nitowaniem, że przyspieszało znacząco czas budowy kadłuba statku. Przeciętny cykl zamykał się w czasie do trzech tygodni, a rekordzista zszedł z pochylni w niecałe siedem dób. Świadomie nawiązałem do przykładu produkcji statków typu „Liberty” [1], ponieważ właśnie ilość i tempo wykonywania połączeń spawanych na jednym obiekcie ujawniły bardzo groźną wadę spawania, to jest nieprzewidywalne pęknięcia stali (szczeliny) w pobliżu spoin. Dziś wiemy, że chodzi o tak zwane **zjawisko kruche go pęknięcia stali**. W latach 1942 – 1952 na około 2000 wyprodukowanych statków, w trakcie eksploatacji aż 253 doznało pęknięć poszycia kadłuba sklasyfikowanych jako poważne, a 26 wręcz rozpołowiło się jeszcze na pochylni. Nic dziwnego, że wiodące towarzystwa klasyfikacyjne, zaczęły wspierać zbieranie doświadczeń produkcyjnych i badań naukowych celem wyjaśnienia przyczyn występowania tego zjawiska. W miarę postępu badań wprowadzano sukcesywnie zalecenia odnośnie sposobu wytwarzania, składu chemicznego i właściwości

mechanicznych stali kadłubowych oraz samej technologii spawalniczej. Kodyfikacją w/w zaleceń było powstanie stowarzyszenia *International Association of Classification Societies* w 1985 roku (z późniejszymi zmianami). Ważniejsze uregulowania to: klasyfikacja stali okrętowych pod kątem przydatności do spawania, wymagane właściwości mechaniczne stali w stosunku do elementów konstrukcyjnych, dopuszczalna grubość blachy poszycia kadłuba w zależności od temperatury środowiska pracy.

Każdy arkusz stali użyty do produkcji musi posiadać **atest materiałowy**, a w nim metrykę pochodzenia, skład chemiczny oraz wyznaczone tzw. stałe materiałowe. Pochodzenie określa producent stali, huta. Dopuszczalność stali do spawania związana jest z jej składem chemicznym (tzw. równoważnik węgla Ce). Wśród stałych materiałowych ważnym parametrem jest tzw. **udarność stali**, limitująca temperaturę otoczenia pracy stali spawanych.

Najpopularniejszą metodą wyznaczania udarności stali jest laboratoryjna próba udarowa na tzw. stanowisku Charpy'ego. A. Charpy, prof. Politechniki Paryskiej, był prekursorem metaloznawstwa na początku XIX wieku. Skonstruował on młot udarowy do badania udarności, działający na zasadzie wahadła matematycznego. Obecnie budowa młota i procedura wyznaczania udarności stali są ujęte w normie unijnej PN-EN 1045 – cz. 1/2 :1994. Powyższa norma definiuje wymagania standardowe. W przypadku użycia konstrukcji spawanych do celów specjalnych, np. budowa statków, o wartości udarności stali stanowią przepisy towarzystw klasyfikacyjnych, nadrzędne nad normą unijną.

### 2. PRZYCZYNY ZJAWISKA PĘKANIA STALI

Jednym z makro czynników mających wpływ na kruche pęknięcie stali są nieuniknione podczas spawania **procesy cieplne**. Powodują one lokalne, wokół spoiny, spiętrzenie się naprężeń wewnątrz materiału, a to skutkuje miejscem inicjacji mikropęknięcia materiału. Mówimy o tzw. strefie wpływu ciepła, wokół spoiny. Na jej zasięg ma istotny wpływ użycie określonej technologii spawalniczej. Aktualna wiedza z dziedziny metaloznawstwa wyróżnia trzy wewnętrzne mikro-mechanizmy niszczące materiał: kruche pęknięcie, zmęczenie i pełzanie. Mechanizmy łączy to, że są powodowane powstawaniem wewnętrznych naprężeń. Rozwój mikropęknięć na skutek naprężeń jest opisany za pomocą teorii Griffith'a i Cottrella [2]. Na skutek zastanych defektów i dylatacji w sieci krystalicznej, tworzą się

dyslokacje krawędziowe. Ich dalszy rozwój może być spowodowany dyfuzją niektórych atomów w sieci pod wpływem tzw. lokalnego **pobudzenia termicznego**.

Pobudzenie termiczne tłumaczy się zmianą wartości energii kinetycznej drgających atomów wewnątrz sieci krystalicznej. Energię kinetyczną można dostarczać (np. uderzeniem mechanicznym) lub zabierać z materiału (np. oziębianie).

### 2.1. Pękanie stali powodowane pobudzeniem termicznym

Dla potrzeb artykułu skupimy się na opisie tak zwanej wewnętrznej energii materiału, która jest sumą energii potencjalnej i kinetycznej wiązań atomowych w sieci [2]. Dla uproszczenia dalszych rozważań pomińmy energię potencjalną. Energia kinetyczna atomów wynika z **drgań termicznych o charakterze oscylacyjnym**. Jest ona proporcjonalna do kwadratu amplitudy oscylacji. Dopóki atomy drgają w miejscu, wokół swych położeń równowagowych dla konkretnej sieci krystalicznej, mówimy o odkształceniach sprężystych materiału. Wzrost amplitudy oscylacji ponad wartość progową dla danej sieci, powoduje trwałe przemieszczenie się atomów w obrębie sieci i mówimy wtedy o odkształceniach plastycznych. Jeszcze większy przyrost amplitudy powoduje trwałe rozproszenie się atomów poza wiązania, czyli pęknięcie próbki po określonym przekroju, tzw. **przełom**.

Wzrost amplitudy oscylacji można pobudzić alternatywnie:

- dostarczając ciepło do wnętrza materiału poprzez podgrzewanie (co ma miejsce podczas spawania),
- dostarczając z zewnątrz energię kinetyczną do wnętrza próbki (co ma miejsce podczas uderzenia w próbkę).

Młot Charpy'ego to nic innego jak wahadło matematyczne, które pozwala zamienić potencjalną energię początkowego wychylenia obucha na równoważną sumę: energii kinetycznej, równej pracy uderzenia łamiącego próbkę, plus potencjalną energię wychylenia końcowego obucha. Dla porównania właściwości materiałów wprowadzamy matematyczny współczynnik, równy pracy wydatkowanej na zerwanie próbki podzielonej przez powierzchnię przekroju poprzecznego próbki. Współczynnik oznaczamy **KV** i nazywamy **udarnością stali**, wzór (1).

$$KV = \frac{W}{S} \quad (1)$$

gdzie: *W* – praca wydatkowana na zerwanie próbki równoważna energii kinetycznej uderzenia,  
*S* – powierzchnia przekroju poprzecznego próbki stalowej w miejscu karbu.

Zatem, kiedy określamy udarność stali, to mierzymy; nieznaną pracę uderzenia *W* [J], przy pomocy młota Charpy'ego oraz wymiarujemy powierzchnię przekroju poprzecznego próbki *S* [mm<sup>2</sup>]. Ponieważ powierzchnia przekroju poprzecznego próbki jest znormalizowana, patrz norma unijna PN-EN 1045 – cz. 1/2: 1994, to o wartości ułamka decyduje wartość licznika, powiązana gatunkiem stali.

### 2.2. Metoda oceniania zjawiska pękania stali

Ponieważ struktura stali nie jest jednorodna, to w procesie pękania zachodzą jednocześnie fazy sprężystego i plastycznego odkształcenia. Ich procentowy udział w cyklu pękania ocenia się po wyglądzie domen na powierzchni faktycznego pęknięcia próbki. Zagadnieniami pękania stali zajmuje się dziedzina metaloznawstwa zwana **fraktografią**. Jako narzędzi laboratoryjnych używa się mikroskopów skaningowych z możliwością fotografowania powierzchni

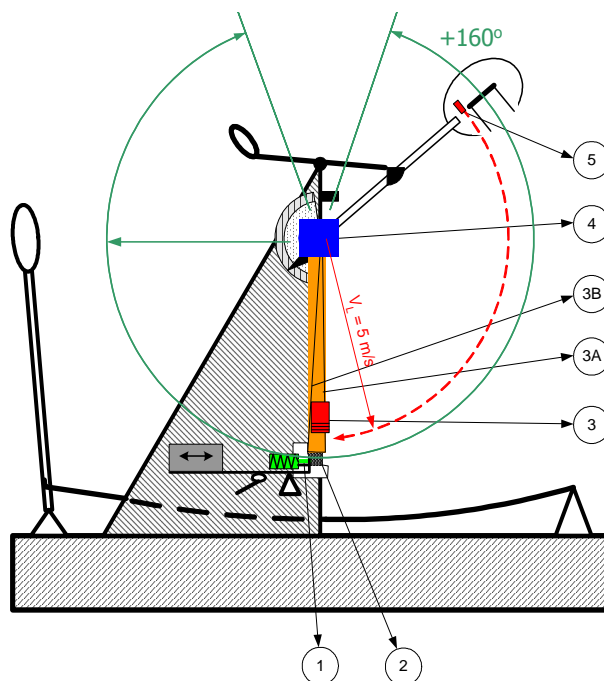
przełomu. Jest to metoda opisowa, post factum. Zatem jawi się potrzeba stworzenia metody pomiaru dynamicznego, który bardziej miarodajnie określi udział faz w procesie pękania. To jest przyczyna modernizacji stanowiska badawczego.

## 3. KONCEPCJA MODERNIZACJI STANOWISKA BADAWCZEGO

Koncepcja modernizacji stanowiska Charpy'ego oparta jest na pomysle pozyskania nowych, dynamicznych danych pomiarowych podczas tradycyjnego badania udarności. Są to; rejestracja siły w czasie uderzenia i wyznaczenie wartości strzałki ugięcia po całkowitym pęknięciu próbki [3].

### 3.1. Warunki modernizacji stanowiska Charpy'ego

Podstawowym warunkiem modernizacji stanowiska było, aby montaż czujników nie naruszał postanowień normy dotyczącej budowy młota Charpy'ego i procedury wykonania próby udarowej stali. Na rysunku 1 pokazano rozmieszczenie dodatkowych czujników na stanowisku.



Rys.1. Rozmieszczenie czujników pomiarowych na stanowisku Charpy'ego [3]

1- akcelerometr piezoelektryczny do pomiaru siły uderzenia, 2 - jarzmo z przyporą, na której leży próbka stalowa, 3 - czujnik zbliżeniowy do pomiaru strzałki ugięcia, 3A-3B - zakres pomiarowy czujnika zbliżeniowego, 4 - enkoder analogowy do pomiaru kątów wychylenia początkowego i końcowego ramienia wahadła, 5- płytka refleksyjna dla czujnika zbliżeniowego.

Drugi warunek modernizacji, „czasowy”, wynikał z technicznego ograniczenia częstotliwości pracy dostępnych na rynku czujników w porównaniu do czasu uderzenia, który wynosi przeciętnie 2-5 ms. Wobec powyższego wymyślono pośrednie metody pomiarowe opisane w rozdziale 3.2 i 3.3.

Na stanowisku zainstalowano trzy czujniki (pozycje 1,3,4, rys.1) podłączone do kanałów oscyloskopu, a oscyloskop sprężnięto z komputerem łączem LAN. W komputerze zainstalowano dedykowane oprogramowanie wykorzystujące możliwości pomiarowe i archiwizacyjne oscyloskopu. Pomiar oscyloskopem siły uderzenia i strzałki ugięcia próbki jest wyzwany automatycznie w zakresie

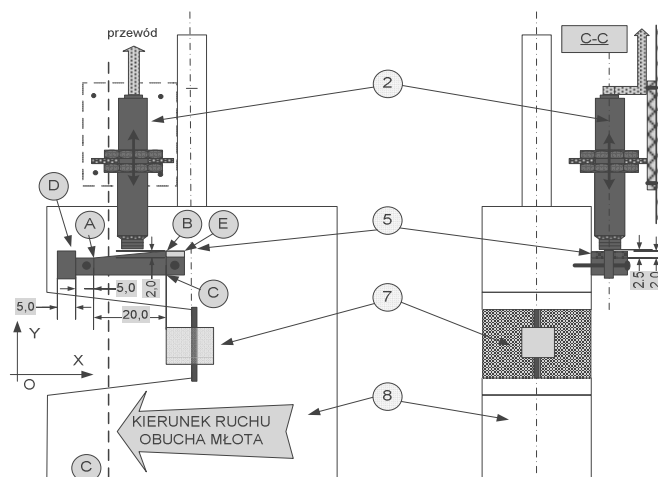
ruchu ramienia młota od 3A do 3B, na bazie konturu sygnału z czujnika zbliżeniowego. Pomiar kąta wychylenia wahadła jest monitorowany w całym zakresie wahnięcia, ale do pamięci zapisywane są jedynie wartości maksymalne sygnału analogowego z enkodera, odpowiadające maksymalnym wychyleniom ramienia młota. Ze względu na ograniczoną prędkość transmisji po łączu LAN, dane pomiarowe ze wszystkich trzech czujników są zapisywane najpierw do pamięci własnej RAM oscyloskopu, a po pomiarze, posługując się aplikacją NI Signal Express, transferowane do komputera, w postaci plików (\*.bmp) oraz (\*.xls). Pliki są wykorzystywane jako dane źródłowe do sporządzenia późniejszych analiz wielokryterialnych. Stąd trzecim warunkiem było dobranie aplikacji kompatybilnej z akwizycją i obróbką danych dla dysponowanego osprzętu.

### 3.2. Pośredni sposób wyznaczenia strzałki ugięcia

Ponieważ pomiar strzałki ugięcia próbki stalowej czujnikiem zbliżeniowym musi być bezkolizyjny, wahnięcia ramienia młota nie można zatrzymać w dowolnym momencie pomiaru, wymyślono rozwiązanie przedstawione na rys.2. Płytkę refleksyjną ⑤ zamontowano na stałe do obucha młota ⑧. W trakcie uderzenia w próbkę ⑦, czujnik zbliżeniowy ② mierzy de facto odległość do przeciwprostokątnej A-B (po osi OY), ale z tangensa dla trójkąta prostokątnego ABC można obliczyć przyrost długości podstawy (po osi OX). W zależności od wartości prędkości wyhamowania obucha w trakcie uderzenia w próbkę, otrzymamy rodzinę liniowych charakterystyk wyjściowych z czujnika zbliżeniowego, w funkcji czasu, o różnych kątach nachylenia. Patrz górna część rys.3. Należy zwrócić uwagę, że charakterystyki są próbkowane co 0,1 ms, co odpowiada maksymalnej (10 kHz) częstotliwości pracy czujnika zbliżeniowego. Po to aby znać bardziej dokładnie moment rozpoczęcia i zakończenia uderzenia w czasie, muszą być spełnione jeszcze dwa warunki. Pierwszy, potrzebny jest drugi czujnik jeszcze szybciej reagujący, to jest pracujący z częstotliwością nie mniejszą w stosunku do czujnika zbliżeniowego. Tym drugim czujnikiem jest akcelerometr piezoelektryczny (20 kHz). Drugi warunek to częstotliwość podkładu np. 20x10 kHz, którą bez problemu uzyskamy z oscyloskopu. Szerokość korony impulsu uderzenia z akcelerometru (patrz dolna część rys. 3) określa fizyczny czas trwania uderzenia w próbkę. Mając wyznaczone odcięte jesteśmy w stanie określić rzędne na charakterystyce wyjściowej czujnika zbliżeniowego, ponieważ przebiegi są zsynchronizowane ze sobą, a po przemnożeniu przez stałą czujnika otrzymamy przyrost drogi płytki po łuku. Ponieważ badana próbka, o boku 10 mm, jest widziana w zakresie 0,7° stopnia kąтового (patrz wycinek 3A-3B rys1) można łuk zastąpić sieczną i skorzystać z twierdzenia Talesa dla trójkątów podobnych. Promień toru ruchu płytki wynosi 650 mm, a promień do środka geometrycznego przekroju próbki wynosi 825 mm. Z proporcji dla trójkątów prostokątnych obliczymy wartość strzałki ugięcia.

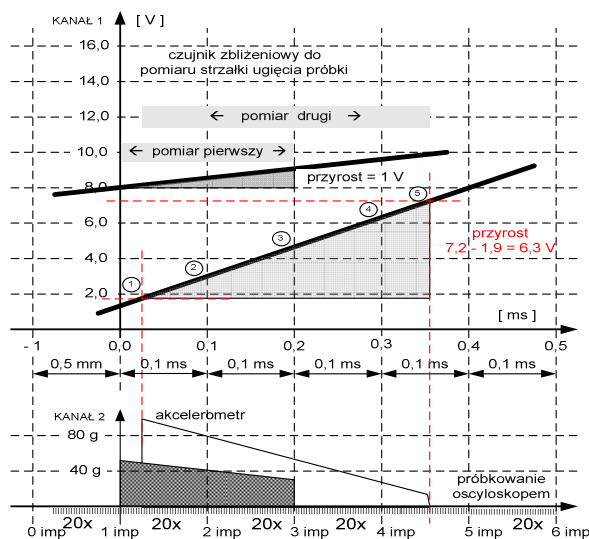
Następnie należało tak zaprojektować kształt górnej krawędzi płytki aby można było wykorzystać sygnał z czujnika zbliżeniowego do sterowania czasem akwizycji danych w pierwszym (czujnik zbliżeniowy) i drugim (akcelerometr) kanale oscyloskopu. Pojemność pamięci własnej oscyloskopu ograniczona jest do 10 k próbkowań. Próg D-A wyznacza skok amplitudowy sygnału wyzwalaający pomiar, przeciwprostokątna A-B wyznacza maksymalny cykl pomiaru, próg B-E zakończenie pomiaru. To rozwiązanie jest optymalnie niezawodne, ponieważ uniezależnia czas pomiaru od prędkości opadania wahadła.

Pomiar jest zawsze wiarygodnie powtarzalny niezależnie od gabarytów próbki, a jest kilka standardów próbek oraz od dokładności ułożenia próbki na przyporze (próbka mniej lub bardziej skośnie ułożona w stosunku do krawędzi przypry).



Rys.2. Montaż płytki i czujnika zbliżeniowego [3]  
 2 - czujnik zbliżeniowy, 5 - płytka refleksyjna, 7 - próbka poddawana próbie udarowej, 8 - obuch młota Charpy'ego

Ponieważ czujnik zbliżeniowy działa na zasadzie porównania różnicy amplitud sygnału emitowanego do powrotnego, powstałej na skutek indukowania się prądów wirowych w namierzonym obiekcie, takie rozwiązanie uniezależnia również pomiar od przypadkowej wielkości i rezystancji kolejno badanych próbek stalowych. Ponieważ namierzamy płytkę, to badana próbka nawet niekoniecznie musi być materiałem indukującym prądy wirowe.

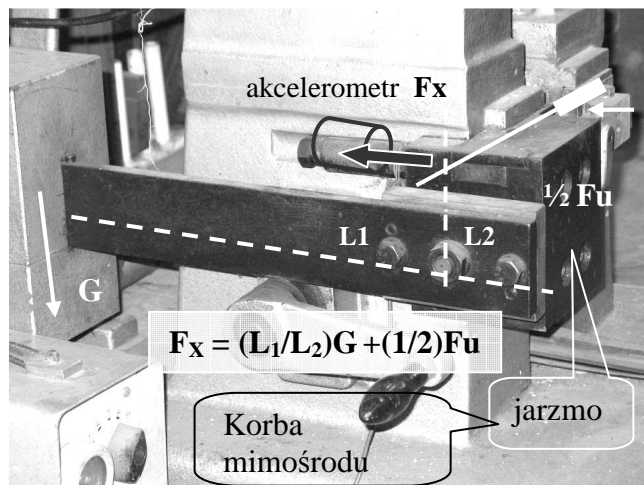


Rys.3. Wyznaczenie strzałki ugięcia [3]

### 3.3 Pośredni sposób wyznaczenia siły udaru

Współczesne akcelerometry mają częstotliwość pracy rzędu 20 kHz, co oznacza, że w jednym cyklu udaru trwającym 2-5 ms jesteśmy w stanie zarejestrować od 40 do 100 próbek. Należy przy tym również mieć wzgląd na amplitudową charakterystykę wyjściową akcelerometru z przedwzmacniaczem pomiarowym. Dedykowana aplikacja komputerowa pozwala zastosować filtry cyfrowe celem obróbki sygnału wyjściowego z piezoelektryka, a w oparciu o wmontowany do oscyloskopu procesor FFT można zastosować analizę spektralną. Reasumując, parametry

czujników zbliżeniowego i akcelerometru dobrano tak, aby otrzymać kilkadziesiąt próbkowań w cyklu pomiarowym, co pozwala otrzymać dostatecznie zróżnicowane wyniki w zależności od rodzaju próbki. Z opisów fraktograficznych wynika, że kruchy przełom próbki stalowej nie następuje według ruchu jednostajnie opóźnionego, dlatego teoretyczny trapez impulsu siły udaru (rys.3) zostanie zastąpiony faktycznym kształtem korony impulsu z akcelerometru.



Rys.4. Przeniesienie siły udaru na akcelerometr [3]

Na rysunku 4 pokazano statyczne momenty fizyczne przeniesienia siły udaru z próbki na akcelerometr. Połowa siły udaru w próbkę  $\frac{1}{2} F_u$  (próbka to belka podparta dwustronnie) przynosi się przy pomocy sztywnego jarzma na akcelerometr bezpośrednio. Druga składowa to siła pochodząca od momentu statycznego dźwigni dwustronnej ( $L_1/L_2$ ) obciążonej przeciwwagą z ciężarem G, która wstępnie dociska akcelerometr. Dźwignia z wykorzystaniem mimośrodów służy również do skalowania akcelerometru.

### 3.4. Pomiar kątów wychyleń ramienia wahadła

Na rysunku 4 pokazano również położenie enkodera analogowego ④, zamontowanego po osiowo nad łożyskiem oporowym wahadła. Encoder podłączono do trzeciego kanału oscyloskopu. Mierzy on na bieżąco kąt wychYLENIA ramienia wahadła w całym zakresie wahnięcia, ale do pamięci oscyloskopu zapisuje jedynie maksymalne wartości kątów przed i po udarze. Zastosowanie enkodera ma tą zaletę, że zwiększając dokładność odczytu kątów wychYLENIA, zmniejszamy błąd względny serii pomiarowej.

## 4. ZESTAWIENIE OSPRZĘTU POMIAROWEGO

Po przejrzaniu ofert osprzętu pomiarowego na rynku dokonano następującego wyboru:

**4.1. MDS-10** precyzyjny analogowy czujnik zbliżeniowy z przedwzmacniaczem **MDT-10**, o zakresie 0,5 – 2,5 mm.

*Medium pomiarowe:* amplituda sygnału wyjściowego jest miarą strat na prądy wirowe, a te zależą od odległości pomiędzy czujnikiem, a namierzonym obiektem.

**4.2. Czujnik siły akcelerometr piezoelektryczny 732A** o zakresie przeciążeń do 500 G, 10 mV/g,  $f_{max}=25$  kHz.  
*Medium pomiarowe:* drgania masy sejsmicznej przeniesione na analogowy prądowy sygnał wyjściowy, który trafia na wzmacniacz pomiarowy drgań bezwzględnych, typ wzmacniacza **VC12S1**, z wyjściem napięciowym 10 V max.

**4.3. Miniaturowy enkoder analogowy Kubler 3670** zapewniający dokładność  $0,5^\circ$  kątowego, z rozróżnieniem kierunku obrotów zgodnie / przeciwnie do ruchu zegara.

*Medium pomiarowe:* sygnał analogowy napięciowy.

**4.4. Cztery kanałowy oscyloskop TDS 3024B** z serii oscyloskopów Tektronix, częstotliwość max do 200 MHz. Istotną zaletą oscyloskopu jest moduł matematyczny **3AAM** do ustawiania funkcji progowych lub logicznych wyzwalania akwizycji danych na poszczególnych kanałach oraz procesor **FFT** do analizy spektralnej.

**4.5. Komputer stacjonarny z oprogramowaniem Signal Express Tektronix Edition**, dedykowanym do obsługi w/w typu oscyloskopu oraz transferu danych do komputera.

Oprogramowanie ma następujące właściwości:

- jest aplikacją należącą do środowiska LabVIEW i pozwala na prezentację wielostanowiskową w LAN,
- steruje zdalnie większością ustawień pomiarowych oscyloskopu,
- transferuje źródłowe dane pomiarowe w formacie (\*.xls) lub jako zrzut obrazu (\*.bmp) do komputera,
- pozwala na analizę spektralną.

## 5. PODSUMOWANIE

Modernizacja stanowiska pozwoli na:

- zwiększenie dokładności serii pomiarowej poprzez dokładne odczyty kątów wychYLENIA z enkodera,
- przyspieszenie sporządzania protokołów pomiarowych z wyborem prezentacji danych na wykresach,
- zapamiętane dane źródłowe mogą być wielokrotnie udostępnione do analizy spektralnej,
- zarchiwizowana komputerowo biblioteka danych pomiarowych będzie bardzo pomocnym narzędziem w opracowywaniu ekspertyz porównawczych stali,
- stanowisko laboratoryjne posłuży celom dydaktycznym na Wydziale Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. www.wikipedia.pl – statki LIBERTY.
2. K. Przybyłowicz: Podstawy teoretyczne metaloznawstwa WNT Warszawa 1999, ISBN 83-204-2342-2.
3. J. Pyszko: Modernizacja stanowiska laboratoryjnego do badania udarności stali metodą Charpy'ego, Praca magisterska wykonana na rzecz PG, 2007

## MODERNIZATION OF CHARPY'S IMPACT TEST STAND

**Keywords:** Charpy impact test, strike force, load amplitude of probe, mathematic pendulum.

The preliminary conception of additional equipment for the Charpy's impact test stand is presented. It enables successive measurement of impulse force curve and deflection of steel specimen during strike tests. After mathematic process data are stored in computer archive files and can be used in future evaluation of fragile breaking. The realised test stand is also very helpful in educational process and enables students to be full acquainted with the modern laboratory equipment.