

Artykuł znajduje się także w książce *Dzwony. Historia, technika ich wykonywania* dra hab. inż. Stefana Gierlotki.

Autorami tekstu są Piotr Olszewski - Pracownia Ludwisarska Jana Felczyńskiego oraz Grzegorz Klyszcz - Firma Rduch Czernica

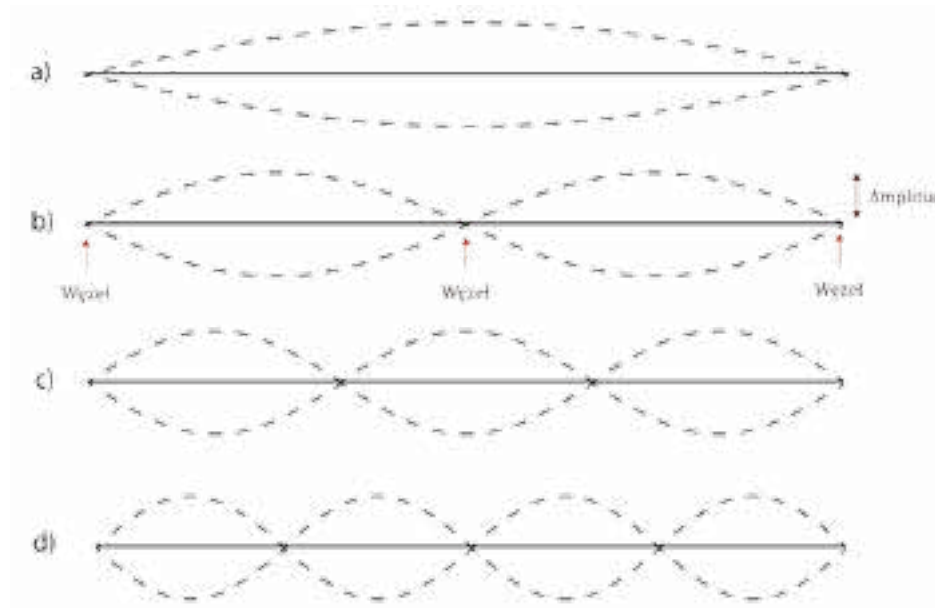


Podstawy akustyki w odniesieniu do dzwonów

Wszystkie czynniki przyczyniające się do udanego odlewu (odpowiedni materiał, profil czy temperatura odlewu) przyczyniają się również do osiągnięcia tego, co najważniejsze w dzwonie, a więc właściwego zgrania tonacyjnego. Dzwon to instrument perkusyjny, bardzo skomplikowany pod względem drgań, jakie się po nim rozchodzą po uderzeniu. Dlatego właściwy profil dzwonu, grubość ścianek w najistotniejszych miejscach oraz składniki stopu używanego do odlewu są skrzętnie skrywaną tajemnicą poszczególnych ludwisarni.

By zrozumieć, co się dzieje z dźwiękiem dzwonu przy uderzeniu, trzeba wyjaśnić naturę wibracji i sam proces powstawania dźwięku. Dźwięk jest formą energii wytwarzaną przez wibrujące ciało. Można to wyjaśnić na przykładzie napiętej struny. Źródłem dźwięku są fale dźwiękowe powstające w wyniku uderzenia w strunę lub jej naciągnięcia. Długość najważniejszej fali, która formułuje ton podstawowy jest równa dwukrotności długości struny. Struna dzieli się na segmenty, wytwarzając korespondujące krótsze fale, których długości są frakcjami ($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$) długości całej struny. Tempo wibracji wzrasta odwrotnie proporcjonalnie do jej długości. Innymi słowy frakcja $\frac{1}{2}$ wibruje dwukrotnie szybciej niż cała struna. Poszczególne segmenty oddzielone są przez punkty równowagi, od których przemieszczenie drgań następuje w odwrotnych kierunkach.

Wibracje struny



Pierwsze cztery segmenty prezentujące fale struny. Dopełnieniem drgań całej struny, która wytwarza ton podstawowy (a), jest podział strun na segmenty (2, 3, 4, 5 itd.). Każdy z segmentów posiada częstotliwość będącą wielokrotnością częstotliwości podstawowej. Te wibrujące segmenty wytwarzają serie harmoniczne. Na drugim przykładzie (b) pełna długość fali została pokazana jako jedna z linii przerywanych. Amplituda tej fali jest liczona jako odległość od pozycji fali do pozycji równowagi. Punkty określone jako węzły nie poruszają się. Ruch wibrujący odbywa się poprzez przemieszczanie się (w dół i w górę) dwóch linii przerywanych (przy stałej pozycji węzłów).

Im większe przemieszczenie – amplituda fali – tym bardziej intensywny dźwięk. Różnice w amplitudzie nie mają natomiast wpływu na tempo wibracji.

Naciąg struny umożliwia jej wibracje. Kiedy powstaną punkty równowagi tworząc fale o danej częstotliwości i amplitudzie, struna drga, aż energia fali jest stopniowo rozpraszana przez wewnętrzne bądź zewnętrzne siły. Rozciąganie struny tak, aby była bardziej napięta nie zmienia długości fali głównej i fal częściowych, ale zwiększa ich częstotliwość (ilość cykli na sekundę albo herców (Hz)) i przez to zmienia tonację.

Instrumenty strunowe są strojone przez regulowanie naciągu strun w czasie grania. Muzyk zmienia tonację poprzez naciskanie palcami odpowiednich punktów – skracając w rezultacie długość struny. W pierwszym przypadku im większy naciąg tym wyższa tonacja, natomiast poprzez na-

ciskanie palcami na strunę, czyli skracanie jej długości, automatycznie zwiększa się tempo wibracji, a więc dźwięk zmienia się na wyższy. W tym przypadku naciąg struny pozostaje niezmienny, ale zmniejszona długość struny wibruje z proporcjonalnie zwiększoną częstotliwością. Jeżeli palec grającego dzieli strunę na dwie równie części, to wibrująca część struny wybrzmiewa o jedną oktawę wyżej niż cała struna, drgając z częstotliwością dokładnie podwojoną.

Również duży wpływ na częstotliwość wibracji ma średnica struny oraz gęstość materiału, z którego jest ona zrobiona. Zatem dwie struny o jednakowej średnicy i pod jednakowym naciągiem, ale zrobione z innych materiałów będą miały inne tempo wibracji. Im większa jest gęstość, tym większa inercja, która prowadzi do zmniejszenia tempa wibracji. Większa średnica również zwiększa inercję, powodując ten sam efekt.

W ciałach stałych istnieją dwa podstawowe typy fal akustycznych – fala poprzeczna i podłużna. W przypadku fali poprzecznej cząsteczki wibrującego materiału (jak te w strunie) poruszają się pod właściwym kątem w kierunku ruchu fali, tzn. w górę i w dół, prostopadle do samej struny.

W drugim przypadku ruch fali podłużnej odbywa się w przód i w tył w kierunku równoległym do rozprzestrzeniania się fali. Ten ruch powoduje występowanie na zmianę obszarów sprężania i rozprężania w wibrującym medium – skupianie i rozsuwanie cząstek, które mogą być gazem (jak powietrze), płynem lub ciałem stałym. Medium musi mieć gęstość i być elastyczne, aby mogło utrzymać wibracje – dźwięk nie może się rozchodzić w próżni. Źródłem podłużnego ruchu może być ciało wibrujące poprzecznie i wytrącające powietrze z jego stanu spoczynkowego, najpierw tworząc obszar kompresji, który od razu przechodzi w obszar rozrzedzenia. Obydwa te obszary przemieszczają się przez medium w przód w regularnych odstępach produkując falę bieżącą. Dystans od jednego obszaru rozrzedzenia do następnego lub jednego obszaru kompresji do następnego to długość jednej fali.

Ton dzwonu jest determinowany przez częstotliwość sukcesywnych fal lub wibracji – na przykład liczbę drgań pojawiających się w danym punkcie na sekundę (cykli na sekundę). Prędkość dźwięku zależy od medium, przez które dźwięk przechodzi. Rozchodzi się on więc szybciej w wodzie niż w powietrzu, szybciej w metalu niż w wodzie i szybciej w stali niż w brązie.

Prędkość dźwięku w danym medium nie zależy od jego wysokości, ponieważ jest ona mierzona jako długość fali pomnożona przez cykle

na sekundę. Jest to ukazane za pomocą wzoru V (prędkość) = WL (długość fali) pomnożona przez CPS (cykle na sekundę). Dlatego, mimo iż większe długości fal wibrują proporcjonalnie wolniej niż mniejsze w danym przedziale czasu, wszystkie dochodzą do ucha słuchaczy w tej samej chwili. Gdyby wyższe tony dochodziły do ucha szybciej niż niższe, powstałby chaos dźwiękowy.

Wzajemne nakładanie się drgań odpowiednich dla tonu podstawowego i wyższych harmonicznych prowadzi do finalnej właściwości dźwięku, tj. jego barwy. Barwa jest zależna od ilości, relatywnej intensywności i dystrybucji alikwotów w źródle tonu. Notabene nie musi to być naturalna harmonika wibrującej struny. Różnica pomiędzy dźwiękiem muzycznym i hałasem jest taka, że pierwszy składa się z jednolitych serii fal dźwiękowych, pochodzących z kombinacji alikwotów w matematycznej zależności (dokładnie wielokrotności), a drugi jest nieregularną serią, której źródło zawiera pomieszczenie niepowiązanych alikwotów.

Alikwoty lub bardziej precyzyjnie najważniejsze z nich muszą zatem być w harmonii z dźwiękiem muzycznym, a ich częstotliwości muszą pozostać stałe w czasie jego trwania.

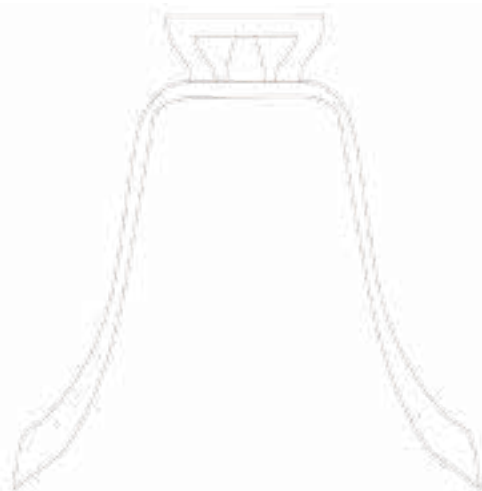
Tworzenie się dźwięku w dzwonie

Jak te podstawy akustyki przekładają się na brzmienie dzwonu pojedynczego lub w zestawie? Charakter dźwięku dzwonu jest determinowany przez rodzaj drgań i miejsce wibracji. Serce uderza w dzwon w najgrubszym miejscu wieńca sercowego w obszarze, gdzie występuje maksymalny ruch elastyczny i rezonans. Wiele częstotliwości powstałych poprzez uderzenie jest powiązanych z charakterystycznymi obszarami wibracji w dzwonie. Te obszary są wyznaczone przez linie, na których ruch radialny (ruch do i z osi dzwonu) jest zerowy w określonej częstotliwości. Takie węzłowe linie spoczynku znajdują się zarówno pionowo dookoła dzwonu (nazywane południkami) jak i poziomo na różnych wysokościach (nazywane równoleżnikami).

Ruch radialny prowadzi do kolejnego, zwanego ruchem tangensowym (ang. *tangential motion*), który jest rozszerzeniem kompresji drgania części ściany dzwonu; jest to uzupełnienie ruchu radialnego i logiczny rezultat jego deformacji. Dźwięk dzwonu jest jednak niemal całkowicie zależny od ruchu radialnego, więc ruch tangensowy nie jest istotny dla dalszych rozważań.

Wyobraźmy sobie dzwon przecięty na pół w płaszczyźnie pionowej i cienki plasterek odcięty z niego. Taki przekrój przypominałby mniej więcej kamerton widelkowy i wibrowałby w podobny sposób. Widelki kamertonu wibrują poziomo od mostka, w którym są złączone i w którym mają węzeł (punkt, w którym nie ma ruchu) blisko podstawy. Kamerton może mieć również inne linie węzłowe wzdłuż jego wideltek, które są powiązane z wyższymi częstotliwościami lub alikwotami. Ale w kamertonie głębokość alikwotów jest celowo przytłumiona, podczas gdy w dzwonie przekrój profilu jest taki, aby je wzbogacać, a zatem dodawać muzyczną jakość do dźwięku wydawanego przez dzwon.

Porównanie dzwonu i kamertonu widelkowego



Przekrój dzwonu



Kamerton widelkowy

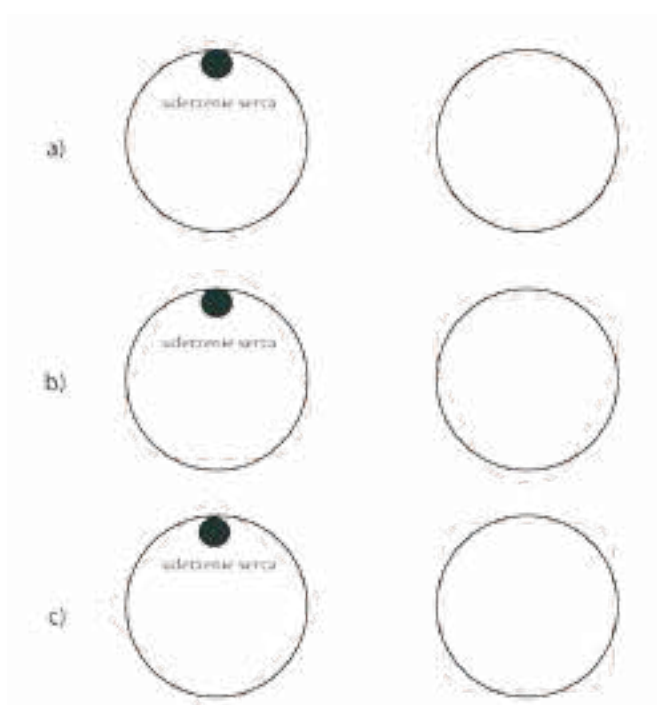
Dzwon może być widziany jako seria cienkich pionowych kawałków połączonych ze sobą. Gdy serce uderza w dzwon zmienia ich kształt z kolistego na bliski elipsy. Elastyczne odbicie zmusza potem wygięcie elipsy w drugą stronę. Powtarzające się zmiany tych dwóch sekwencji powodują powstawanie tonu podstawowego (prymy) oraz oktawy dolnej (*hum*). Ten typ ruchu powoduje powstanie czterech węzłów na obwodzie dzwonu, które nie poruszają się radialnie w stosunku do osi dzwonu.

Te cztery pionowe węzły znajdujące się w równej odległości od osi dzwonu, biegnące od krawędzi dolnej do hełmu dzwonu tworzą linie

węzłowe (południki), a ich umiejscowienie zależy od punktu, w który uderza serce.

Ponieważ wstępna deformacja dzwonu nie jest czystą elipsą, powstają również inne południki węzłowe. Te piony są również powiązane z różnymi alikwotami w dzwonie – zarówno tymi, które można stroić, jak i tymi, których stroić się nie da. Zostało potwierdzone, że wibrujące segmenty wytwarzające alikwoty tercji małej oraz kwinty są odseparowane przez sześć południków węzłowych formujących trzy długości fali; te powodujące powstanie oktawy górnej są oddzielone przez osiem południków formujących cztery długości fali.

Wibracje dzwonu

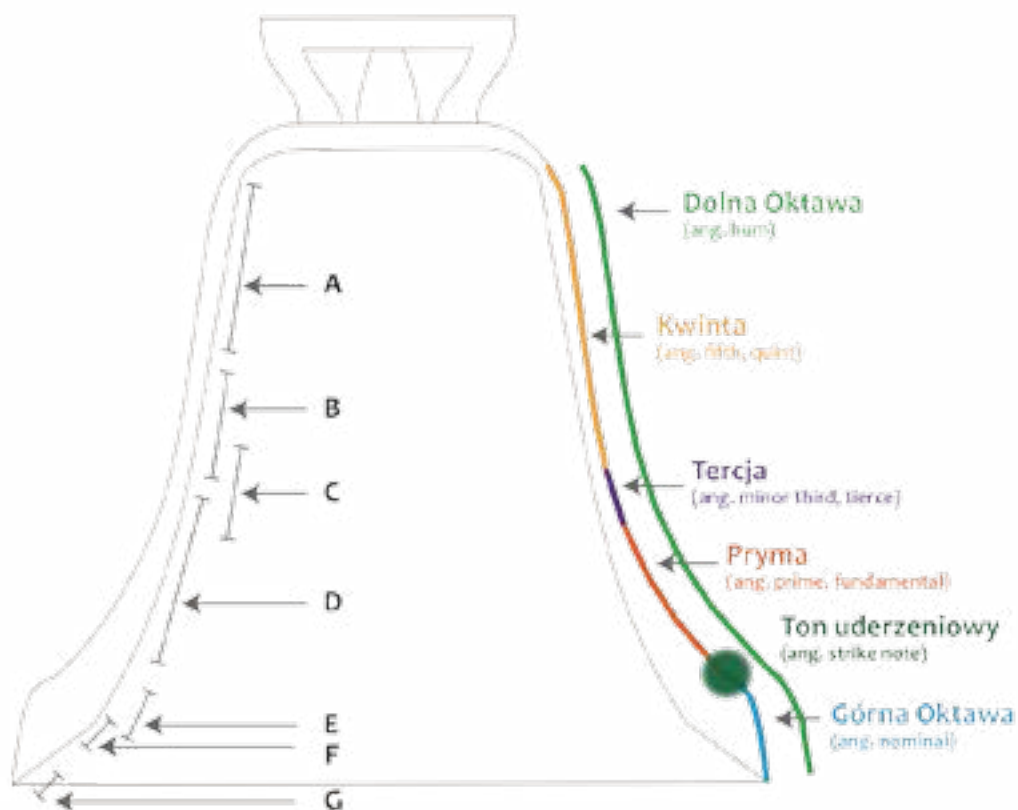


Rysunek pomaga zilustrować powyższe zagadnienie. Na szkicu obwodu dzwonu pokazano obszary węzłowe (gdzie przecinają się linie) ważnych alikwotów lub pozycje południków. Na pierwszej ilustracji (a) widzimy powstanie czterech węzłów na obwodzie dzwonu (miejsca przecięcia się linii przerywanej z obwodem). Ten ruch powoduje powstanie tonu podstawowego oraz oktawy dolnej. Na drugiej ilustracji (b) widzimy powstanie już sześciu węzłów na obwodzie dzwonu. Ten ruch jest odpowiedzialny za ton tercji małej i kwinty. Na trzeciej ilustracji (c) widzimy powstanie ośmiu węzłów na obwodzie dzwonu. Ten ruch odpowiada w głównej mierze za ton oktawy górnej oraz wyższych alikwotów, których nie można stroić.

powyżej wieńca sercowego, przylega do tonu podstawowego i jest raczej wąskim obszarem dookoła dzwonu, gdzie grubość jego ściany zaczyna się zżęzać. Kwinta pojawia się powyżej tego obszaru w połowie płaszcza dzwonu i dochodzi aż do hełmu. Ściana dzwonu jest tutaj cieńsza i rezonans jest dużo mniejszy niż w przypadku dolnej części dzwonu.

Strojenie dzwonów jest zagadnieniem niezwykle skomplikowanym. Często źle wykonany profil dzwonu przekreśla szanse na udane brzmienie tego instrumentu. W większości przypadków nie udaje się odlać idealnych dzwonów, więc wymagane jest ich strojenie. Wykonuje się je za pomocą szlifowania określonych miejsc w wewnętrznej części dzwonu, aż do uzyskania odpowiedniej korekty danych alikwotów. Poniżej przedstawiony jest przekrój dzwonu wraz z zaznaczonymi miejscami, których szlifowanie może dostroić dzwon do optymalnych parametrów muzycznych.

Obszary szlifowane podczas strojenia dzwonów



Pozycje wzbudzania alikwotów zostały ukazane po prawej stronie rysunku. Po lewej ukazano obszary, które należy szlifować w celu zmiany częstotliwości alikwotów. I tak szlifowanie:

- w obszarze A obniża ton podstawowy i oktawę dolną,
- w obszarze B obniża kwintę,
- w obszarze C obniża tercję i oktawę górną,
- w obszarze D obniża ton podstawowy,
- w obszarze E podwyższa prymę,
- w obszarze F obniża oktawę górną,
- w obszarze G podwyższa oktawę górną.

Główne alikwoty dzwonu i ich interpretacja !

Wiemy już jak i w których obszarach powstają główne alikwoty dzwonu. Zajmijmy się teraz ich interpretacją i znaczeniem dla akustyki dzwonu. Głównymi alikwotami (a więc tonami pobocznymi) dzwonu są:

- pryma (ang. *prime* lub *fundamental*)
- tercja mała (ang. *terce*, *minor third*)
- kwinta (ang. *quint*)
- oktawa górna (ang. *nominal*) – oktawa powyżej prymy
- oktawa dolna (ang. *hum*) – oktawa poniżej prymy

Wszystkie te tony składają się na dźwięk dzwonu, który słyszymy. Ton uderzeniowy (ang. *strike note*) w dobrze zestrojonym dzwonie powinien być bliski tonowi podstawowemu (prymie).

Oktawa dolna jest dźwiękiem, który wibruje najdłużej, dlatego też stwarza wrażenie „pomruku” i stąd jego nazwa angielska – *hum* (od czasownika *to hum* – buczeć, brzęczeć). Ponieważ ten alikwot jest poniżej częstotliwości tonu podstawowego (prymy) jest często niepoprawnie identyfikowany z tonem podstawowym. Tymczasem może on być całkiem poprawnie nazwany pierwszym tonem pobocznym (aliquotem) dzwonu.

Należy podkreślić, że dźwięk alikwotów dzwonu jest bardziej zharmonizowany z tonem podstawowym niż tych w wibrującej strunie. Nawet muzykolog ma ogromną trudność, aby wyróżnić większość z nich. W większych dzwonach wyraźniejszy jest ton oktawy dolnej, dzięki czemu może być dużo łatwiejszy do zidentyfikowania.

Przy uderzeniu powstaje dźwięk nazwany tonem uderzeniowym, dominujący momentalnie. Ton uderzeniowy w odróżnieniu od alikwotów nie może być mierzony z dokładną częstotliwością. Możemy powiedzieć, że jest to pierwsza impresja, odczucie, które dochodzi do ucha słuchającego po aktywacji połączonych częstotliwości w ich wstępnej

amplitudzie – połączony efekt specyficznej barwy dźwięku. Jego tonacja powinna zbiegać się z tonem podstawowym, który chwilę później dominuje główne brzmienie dzwonu.

Bardzo istotnym tonem pobocznym w brzmieniu dzwonu jest tercja mała. Kiedy alikwoty dzwonu są porównywane do alikwotów struny różnica jest ewidentna – podczas gdy pierwsze i najmocniejsze alikwoty struny formują trójdźwięk durowy (np. c, e, g), te w dzwonie są strojone do trójdźwięku molowego (np. c, es, g). Dźwięk tercji małej (np. es) jest niezwykle ważny dla barwy dzwonu i musi być obecny. Z kolei istnienie w dzwonie tercji dużej powodowałoby, iż jego dźwięk byłby niezgrany.

Zagadnienie interpretacji i zgrania harmonicznego najważniejszych alikwotów dzwonu można podsumować następująco:

- ton uderzeniowy, główny powstaje i jest przede wszystkim słyszalny w momencie uderzenia, więc powinien być zbliżony do tonu podstawowego (prymy)

- ton podstawowy (pryma) – jest głównym alikwotem dźwięku dzwonu

- tercja mała – definiuje molowy charakter dzwonu

- kwinta – szczególnie w większych dzwonach ma najmniejszy wpływ na finalny dźwięk dzwonu (pryma, tercja i kwinta tworzą akord molowy w dzwonie)

- oktawa dolna to ważny alikwot w dzwonie – powinna być zawsze dokładnie o oktawę niższa od tonu podstawowego, wpływa na rozdźwięk dzwonu, tzw. warkot

- oktawa górna powinna być zawsze dokładnie o oktawę wyższa od tonu podstawowego.

Dla odpowiedniego zgrania harmonicznego ważny jest więc proces samego strojenia dzwonu, aby mógł być on nazwany instrumentem muzycznym. Pod tym względem dzwon również jest wyjątkowy. Bogactwo alikwotów, perfekcja mieszania materiału do odlewu wzbogaca finalny ton dzwonu tworząc kalejdoskop rezonansowy. Magnetyczna atrakcyjność dzwonu w każdym calu pochodzi od szerokiego spektrum tonacyjnego, które przyczynia się do powstania niezwyklej aury tajemniczości dźwięku dzwonu.

Akustyka dzwonów w Polsce

W Polsce pomimo ponad 200-letniej tradycji ludwisarskiej wielu odlewni dzwonów, ciężkie czasy wojenne oraz komunistyczne uniemożliwiały

przez długie dziesięciolecia pracę ludwisarzy nad doskonaleniem akustycznym dzwonów. Brak dojścia do najnowszych rozwiązań światowych w tym zakresie, brak możliwości zakupu najlepszej jakości materiałów powodowały, iż pomimo największych chęci polskich ludwisarzy przez długi okres wiele dzwonów nie było idealnie zgranych harmonicznie, gdyż nie uwzględniały wszystkich alikwotów. Polskie dzwony posiadały najczęściej ton podstawowy lub oktawę dolną odpowiednio zgraną, ale dokładna analiza dźwięku była przez dziesiątki lat utrudniona.

Po 1989 roku odlewnie zaczęły jednak na nowo śledzić osiągnięcia rynków światowych i doskonalić sztukę strojenia dzwonów. Pomału do ludwisarni docierała zarówno najnowsza wiedza europejska dotycząca strojenia dzwonów, jak i najdokładniejsza aparatura pomiarowa – włączając w to kamertony widelkowe oraz najnowsze osiągnięcia programistyczne służące do pomiarów poszczególnych alikwotów w dzwonach.

Dziś wiele idealnie zgranych dzwonów pochodzi z Pracowni Ludwisarskiej Jana Felczyńskiego z Przemyśla, prowadzonej obecnie przez Piotra Olszewskiego (prawnuka Jana) oraz jego ojca Waldemara.

Dzwony dla Sanktuarium św. Jacka w Kamieniu Śląskim

W roku 2012 Pracownia Ludwisarska Jana Felczyńskiego pokazała, jak ważne jest zgranie tonacyjne dzwonów i jak wspaniałe instrument muzyczny stanowi zharmonizowany zestaw dzwonów.

Dzięki staraniom ks. abp Alfonsa Nossola oraz ks. dr Alberta Glaesera do Sanktuarium św. Jacka w Kamieniu Śląskim trafiło pięć dzwonów z niemieckiej parafii w Bochum. Te wspaniałe dzwony pochodzące ze znanej niemieckiej odlewni miały zawisnąć na nowo w specjalnie powstałej wieży usytuowanej tuż obok kaplicy św. Jacka.

Ksiądz dyrektor Albert Glaeser zdecydował, iż pięć dzwonów niemieckich powinno być uzupełnionych o trzy dodatkowe dzwony pochodzące z polskiej ludwisarni. Po licznych dyskusjach wytypowano Pracownię Ludwisarską Jana Felczyńskiego z Przemyśla.

Warunkiem koniecznym było nie tylko odlanie dzwonów o odpowiednich tonach głównych, ale także idealne dostrojenie tych trzech dzwonów do całego zestawu oraz przeprowadzenie przez kampanologa badań potwierdzających zgodność harmoniczną wszystkich alikwotów (oktawy dolnej, prymy, tercji, kwinty, oktawy górnej).

Dzwony odlane przez Pracownię Ludwisarską Jana Felczyńskiego zostały poddane badaniom kampanologa Petra Jandy z Brna, uznanego autorytetu w dziedzinie badań dzwonów w Europie. Ekspert ten nie zgłosił żadnych zastrzeżeń i był pod wrażeniem jakości polskich dzwonów. Na końcu tego rozdziału znajduje się certyfikat, który potwierdza zgranie tonacyjne w każdym z dzwonów. Certyfikat ten kończy się podsumowaniem o następującym brzmieniu:

„Wszystkie trzy dzwony są w harmonii i przedział tolerancji nieustannie podąża za starymi dzwonami, delikatna gradacja w tym kierunku jest pożądana. Można podsumować, że Pracownia Ludwisarska Jana Felczyńskiego z Przemyśla sprostała wyzwaniu bardzo dobrze oraz że wszystkie warunki zostały spełnione ku temu, aby imponujący zestaw ośmiu dzwonów w Kamieniu Śląskim nazwać w pełni instrumentem muzycznym”.

Dodatkową trudnością przedsięwzięcia w Kamieniu Śląskim było idealne zgranie barwowe dzwonów. Udało się to osiągnąć dzięki odpowiedniemu stopowi dzwonów w odniesieniu do serc i zastosowaniu korygujących wkładek do dzwonów niemieckich.

Dzwon dla Bazyliki Najświętszej Maryi Panny w Piekarach Śląskich

Kolejnym projektem, który wymagał potwierdzenia kampanologicznego, było odlanie dzwonu dla Bazyliki Najświętszej Maryi Panny w Piekarach Śląskich. W październiku 2013 został odlany dzwon do Bazyliki, który oprócz wizerunku Matki Boskiej Piekarskiej posiadał również wizerunek Jana Pawła II, ogłoszonego w roku 2013 świętym. Po odlaniu dzwonu i przeprowadzeniu ekspertyz akustycznych potwierdzono następujące parametry dźwiękowe dzwonu:

oktawa dolna – A/0
ton podstawowy – A/1
tercja – C/2
kwinta – E/2
oktawa górna – A/2

Powyższe alikwoty cechowały się śladowymi lub zerowymi odchyleniami, co świadczy o kunszcie ludwisarzy.

Piekary Śląskie otrzymały więc wspaniałą dzwon idealnie zestrojony muzycznie, który przez setki lat będzie rozbrzmiewał na chwałę Pana.

Ważne są również badania przeprowadzane przy pomocy najnowocześniejszego oprogramowania, które oprócz tradycyjnych kamertonów widełkowych służy w Pracowni Ludwisarskiej Jana Felczyńskiego z Przemyśla do pomiarów akustycznych.