

Carlo Mapelli  
Walter Nicodemi  
Roberto Venturini

## Studio dei fenomeni di degrado di canne in lega metallica appartenenti ad organi musicali italiani di diverse epoche

### Study of the deterioration of metal alloy organ pipes from different periods in Italy

Gli organi musicali sono dei sistemi meccanici estremamente complessi e per certi versi assai delicati, dato che i materiali che li compongono possono essere aggrediti dagli agenti ambientali. L'arte organaria italiana ci ha consegnato nei secoli un inestimabile patrimonio culturale, che ha rappresentato ed è tuttora una parte integrante nella formazione e nello sviluppo della tradizione musicale italiana [Figura 1']. Ogni organo presenta particolari caratteristiche di sonorità che dipendono dal tipo di materiali utilizzati, dalle tecniche utilizzate per la loro lavorazione, nonché dalle modalità di assemblaggio dei componenti. Ognuno di questi aspetti era il frutto di un patrimonio di conoscenze sviluppato da ogni bottega organaria e gelosamente custodito, tanto che gli strumenti musicali realizzati da diverse botteghe presentano differenze nella sonorità che possono essere chiaramente avvertite anche da ascoltatori non esperti.

Le canne in lega metallica degli organi musicali sono un componente fondamentale per conseguire la desiderata qualità sonora dello strumento, ma esse sono soggette a dei fenomeni di degrado progressivo che nel tempo può portare al danneggiamento delle loro superfici o, addirittura, alla foratura delle stesse. L'attività della Sezione Materiali

Pipe organs are highly complex mechanical systems and quite delicate in some respects in that their component materials are prone to environmental attack. The Italian art of organ building has over the centuries handed down to us a priceless cultural heritage, which has always represented a key factor in forming and developing the Italian musical tradition [Figure 1']. Each organ has special sound characteristics, depending on the type of materials used, the techniques adopted to process these materials and the method of assembly of the components. Each of these aspects was the outcome of the expertise developed by every organ-making workshop and a closely kept secret, to the extent that the musical instruments made by the various workshops have differences in resonance which can be heard plainly even by the less knowledgeable listener. Organ pipes in a metal alloy are essential components in achieving the required sound quality of the instrument, however they are prone to gradual deterioration, which in time can lead to damage or even holes in their surfaces. Work at the Materials for Mechanical Applications Section of the Department of Mechanics was carried out together with some Italian organ-making workshops and focused on the study of pipes of mechanical organs in various regions of Italy dating from the eighteenth century onwards. This research aimed at:

- discovering the causes and features of the deterioration process;
- evaluating possible remedies;
- finding means of preventing damage.

Studies carried out at the Politecnico di Milano, as part of research which also provided training opportunities for students in materials engineering, focused on organ pipes with a tin alloy base which, due to their attractive shine, are used as façade pipes.

There is widespread belief that damage to organ pipes is caused by an alteration in crystals leading to changes in the lattice of the tin from tetragonal to cubic as a result of a drop in temperature. Knowledge of the transformation of the crystal lattice in pure tin tells us that it takes place at 13.2°C and reduces the tin to a grey powder. This process is known as *tin disease* or *tin plague* and involves both aesthetic damage and an irreversible structural alteration [Figure 2']. Moreover the significance of this phenomenon has hitherto been unknown, not so much in the case of pure tin but in that of tin alloys. Even if it should occur, it has not been clear

per Applicazioni Meccaniche del Dipartimento di Meccanica è stata svolta in collaborazione con alcune botteghe organarie italiane e si è concentrata sullo studio di canne di organi musicali meccanici localizzati in diverse regioni italiane e costruiti a partire dal XVIII secolo.

Tale attività di ricerca è finalizzata a cogliere:

- cause e caratteristiche del processo di degrado;
- valutazione dei possibili rimedi;
- modalità di prevenzione del danneggiamento.

Negli studi realizzati presso il Politecnico di Milano, nell'ambito di una ricerca che è stata anche occasione per l'attività di formazione degli studenti di Ingegneria dei Materiali, ci si è concentrati sulle canne d'organo a base di lega di stagno che, per le loro caratteristiche estetiche di lucentezza, vengono utilizzate per la costruzione delle canne di facciata. È ampiamente diffusa la convinzione che il danneggiamento delle canne d'organo sia causato da una trasformazione a livello cristallino, che comporta la trasformazione del reticolo dello stagno da tetragonale a cubico a seguito dell'abbassamento della temperatura. In base alle conoscenze relative alle trasformazioni del reticolo cristallino dello stagno puro, è noto che essa ha luogo a 13.2°C e riduce lo stagno in forma pulverulenta e gli conferisce una colorazione grigia. Un tale processo è noto come *cancro dello stagno* o *peste dello stagno* e implica sia un danno estetico che un'alterazione strutturale non reversibile [Figura 2\*]. D'altra parte, non è finora conosciuto quanto questo fenomeno sia rilevante, non tanto nel caso dello stagno puro, ma in quello delle leghe di stagno. Anche se tale fenomeno dovesse verificarsi, non è sinora stato chiaro se il cambiamento di temperatura sia il fattore scatenante o se anche altri agenti siano in grado di attivare la trasformazione.

Per rispondere a tali domande è stato necessario

#### 1.

Esempio di organo storico:

Chiesa di S.Giacomo

Maggiore, INZOLI Cav.

Pacifico & Figli, 1912

A historical organ in the

church of S.Giacomo

Maggiore, INZOLI Cav.

Pacifico & Figli, 1912



to date whether it is triggered by the change in temperature or whether other factors are responsible for the change.

To answer these questions it was necessary to set up an experimental research method aimed at obtaining results for various aspects, which, when integrated, can provide a solution to the problems briefly described above.

The technique chosen to indicate the possible onset of the crystal transformation in the tin alloys studied is that of differential scanning calorimetry (DSC). This technique consists of placing from 50

organizzare una procedura di indagine sperimentale mirata ad ottenere risultati relativi a diversi aspetti, la cui integrazione può consentire di rispondere alle problematiche esposte sinteticamente.

La tecnica scelta per evidenziare l'eventuale insorgenza della trasformazione cristallina nelle leghe di stagno studiate è quella della scansione calorimetrica differenziale (DSC-Differential Scanning Calorimetry). Tale tecnica consiste nell'inserire da 50 a 100 mg del materiale studiato in un forno dotato di sensori termici in grado di percepire emissioni ed assorbimenti di calore da parte della lega metallica durante un ciclo termico. Tale tecnica si basa sul fatto che le emissioni o gli assorbimenti di calore si realizzano in corrispondenza di trasformazioni dello stato fisico dei materiali (transizioni da liquido a solido e viceversa) o della loro struttura cristallina. Nelle leghe di stagno analizzate non è stata rilevata a temperatura ambiente la trasformazione cristallina che conduce al cosiddetto *cancro dello stagno*, e gli unici picchi di emissione ed assorbimento di calore che sono stati individuati sono quelli relativi alla transizione solido-liquido. Quindi, la temperatura non sembra essere l'aspetto scatenante del fenomeno di degrado.

L'indagine della microstruttura del metallo è stata condotta attraverso microscopio ottico [Figura 4'] ed elettronico a scansione (SEM – Scanning Electron Microscopy) [Figura 5'] equipaggiato con microsonda EDS (Energy Dispersion Spectroscopy), che ha consentito la determinazione quantitativa della composizione chimica della lega metallica nonché quella delle zone andate soggette a degrado. L'analisi chimica quantitativa ha messo in evidenza la presenza nelle leghe di stagno di altri elementi chimici tra i quali si evidenziano principalmente il piombo, l'arsenico, il bismuto, l'antimonio, il calcio,

## 2.

Esempi di parti di canne d'organo del XVIII sec. asportate a seguito del degrado

Examples of organ pipe parts from the 18<sup>th</sup> century removed as a result of deterioration



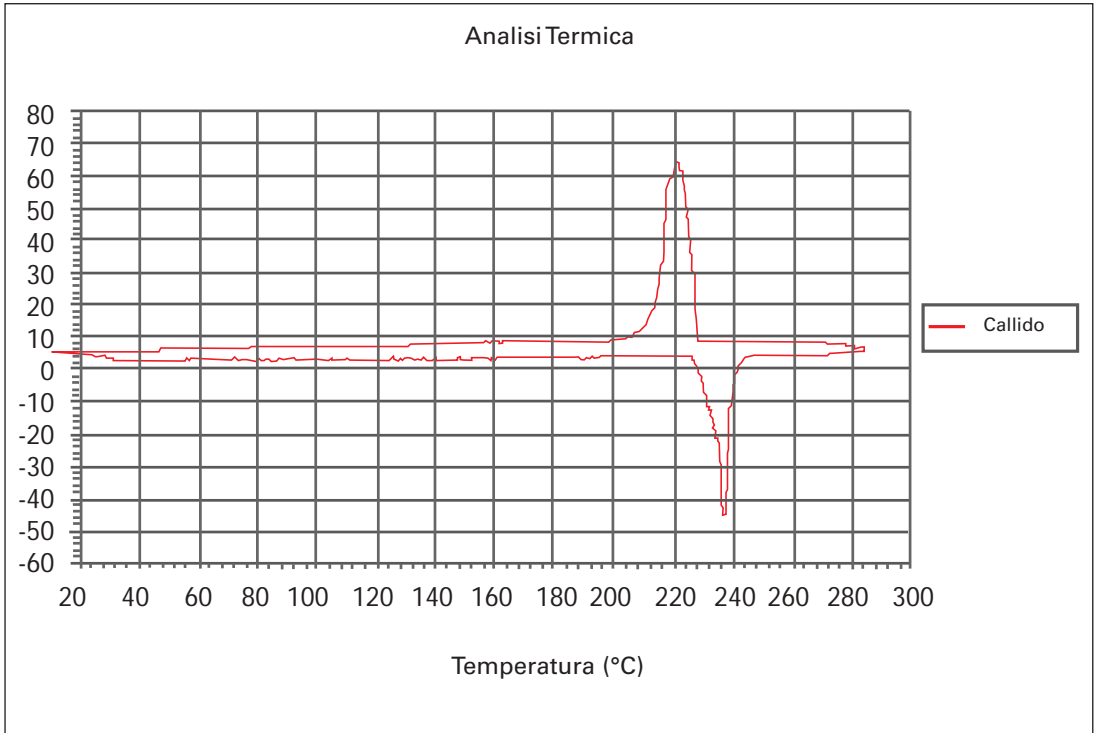
to 100 mg of the material researched inside an oven equipped with heat sensors able to detect the emission and absorption of heat by the metal alloy during a heat cycle. It is based on the fact that heat is emitted or absorbed parallel to changes in the physical state of the materials (change from liquid to solid and vice versa) or their crystalline structure. In the tin alloys analysed the crystal transformation which leads to the so-called *tin disease* was not detected at ambient temperature and the only peaks of heat emission and absorption identified were those relating to the change from solid to liquid. Therefore temperature does not appear to be the trigger in deterioration.

Research into the microstructure of the metal was carried out using an optical microscope [Figure 4'] and scanning electron microscope (SEM) [Figure 5'] equipped with an EDS (energy dispersion spectroscopy) microprobe which allowed a quantitative calculation of the chemical composition of the metal alloy and that of the decayed areas. The quantitative chemical analysis highlighted the presence in the tin alloys of other chemical elements including, above all, lead, arsenic, bismuth, antimonium, calcium, copper, iron

3.

Esempio di tracciato dell'analisi calorimetrica svolta sulle leghe di Sn analizzate. I picchi rappresentano l'emissione e la cessione di calore in corrispondenza delle temperature a cui avviene la transizione

Example of the trace of the calorimetric analysis of the Sn alloys studied. The peaks represent the emission and transfer of heat at temperatures at which the transition occurs



il rame, il ferro ed il cloro. La presenza di bismuto, antimonio, piombo ed arsenico è in grado di inibire, a temperatura ambiente, l'insorgenza del *cancro dello stagno* e questo spiega la ragione per cui la transizione cristallina non sia stata rilevata nelle indagini calorimetriche.

L'esame delle regioni andate soggette a degrado ha posto in evidenza come esse siano interessate da un forte decremento nella concentrazione di piombo (tanto da portare in alcuni casi alla sua scomparsa), dalla completa scomparsa di arsenico, nonché dalla persistente presenza di cloro e di carbonio nelle

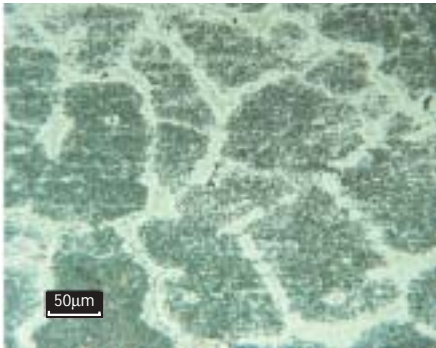
and chlorine. The bismuth, antimony, lead and arsenic are capable of inhibiting the onset of *tin disease* at ambient temperature which explains why the crystal transition was not detected during the calorimetry tests.

Examination of deteriorated areas showed how they are affected by a strong decrease in the concentration of lead (to the extent that it disappears in some cases), by the total disappearance of the arsenic and the enduring presence of chlorine and carbon in the damaged areas, although these elements were not included, except in negligible

4.

Grani di una lega a base stagno evidenziati al microscopio ottico dopo un attacco in soluzione 2% $\text{HNO}_3$ -98% etanolo

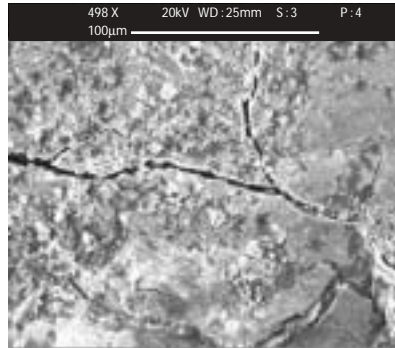
Grains of a tin-based alloy shown under an optical microscope after attack in a 2% $\text{HNO}_3$ -98%ethanol solution



5.

Esempio di zona soggetta a degrado osservata con il microscopio elettronico a scansione. Si evidenziano cricche e formazione di residui pulverulenti sulla superficie

Example of an area with deterioration, observed under the scanning electronic microscope. Cracks and the formation of powder residues on the surface can be seen



regioni danneggiate, benché tali elementi non fossero presenti, se non in quantità irrisoria, nella composizione chimica della lega.

Dopo aver operato tali prove sperimentali è stato necessario interpretare i risultati attraverso un loro confronto che permetta di cogliere gli aspetti fondamentali del processo di danneggiamento, al fine di capire se esso sia irreversibile, e quali siano i provvedimenti di prevenzione da adottare.

L'insieme dei dati raccolti vede nel cloro il principale imputato del processo dell'insacco del fenomeno di danneggiamento. Infatti, tale elemento chimico si presenta su tutte le regioni degradate.

La sua presenza è in grado di spiegare la completa scomparsa dell'arsenico che può formare il tri-cloruro di arsenico che a temperatura ambiente è allo stato gassoso. Parimenti, il cloro può interagire e combinarsi anche con il bismuto, l'antimonio ed il piombo, che in questo modo vengono rimossi dalla lega metallica. La rimozione degli elementi che inibiscono la trasformazione dello stagno può portare quest'ultimo a subire il processo di trasformazione cristallina che ne altera irrimediabilmente l'integrità strutturale. Quindi, il *cancro dello stagno*

amounts, in the chemical composition of the alloy. At the end of these experimental tests the results had to be interpreted through their comparison to comprehend the basic aspects of the process of damage, whether this is irreversible and which preventive measures have to be adopted. All the data collected indicate chlorine as the main factor responsible for triggering damage. Effectively this chemical element is found in all the deteriorated areas and its presence can explain the complete disappearance of the arsenic which may form arsenic trichloride, which at ambient temperature is in the gaseous state. Likewise the chlorine can interact and combine also with the bismuth, antimony and lead, which in this way are removed from the metal alloy. Removal of the elements which prevent transformation of the tin can cause the latter to undergo the crystalline transformation which irreparably alters its structural features. Therefore the *tin disease* is not the trigger but instead a consequence. Finally it should be noted that these processes are fostered by a high degree of humidity which can, in the presence of carbon dioxide, also lead to the formation of carbonates.

First of all it was established that this is an irrever-

non risulta essere il fenomeno scatenante ma una conseguenza. Infine, va osservato che tali processi risultano favoriti dalla presenza di un alto tasso di umidità che può portare, in presenza di anidride carbonica, anche alla formazione di carbonati. Anzitutto, si è stabilito che si tratta di un processo irreversibile a cui è possibile porre rimedio solo con la rimozione e la sostituzione delle parti alterate. Quindi il meccanismo di degrado va prevenuto mediante il mantenimento di atmosfere con tasso di umidità controllato e con una scarsa presenza di cloro, i cui composti possono generarsi principalmente dal degrado dei componenti lignei con cui le canne metalliche sono in contatto. È indicativo che anche nei secoli passati in ambiente marino vi fosse una maggiore presenza di canne in legno rispetto a canne in lega metallica che potevano risentire di una maggiore presenza di cloruri nell'atmosfera. Sicuramente, il lavoro svolto non esaurisce la tipologia dei fenomeni di degrado a cui possono andare soggette le canne d'organo, ma ha consentito di mettere a punto una metodologia di indagine che può essere estesa ad altre situazioni e ha permesso di individuare uno dei fattori principali che devono essere contrastati per prevenire il degrado delle canne d'organo a base di stagno.

sible process which can only be remedied by removing and replacing the affected parts. The mechanism of deterioration should then be prevented by maintaining atmospheres with a controlled humidity rate and low quantity of chlorine, whose compounds can be generated mainly by the deterioration of the wooden parts with which the metal pipes come into contact. It is symptomatic that also in past centuries in coastal areas there were more wood than metal alloy pipes which could be affected by a higher quantity of chlorides in the atmosphere. The work carried out does not obviously cover all the types of deterioration which organ pipes may suffer, but it has enabled a focus on the research method which can be extended to other situations and has identified one of the main factors which have to be combated to prevent deterioration of organ pipes with a tin base.