

Медные сплавы для реставрации язычковых труб в исторических органах

Б. Б. Страумал¹⁻³, Б. Барецки³, Я. Калниньш⁴, А. Аслунд⁵, М. Фризель⁶

¹ Московский государственный институт стали и сплавов (Технологический университет), Москва, Россия, straumal@issp.ac.ru

² Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Россия

³ Институт металловедения общества им. Макса Планка, Штутгарт, Германия

⁴ Органная мастерская Угалэ, Угалэ, Латвия

⁵ Университет Гетеборга, Факультет изящных и прикладных искусств, Гетеборгский центр органного искусства, Гетеборг, Швеция

⁶ Гетеборгский технический университет им. Чалмерса, Факультет фундаментальной и технической физики, Гетеборг, Швеция

В работе изучен состав 48 исторических латунных деталей из органов, изготовленных в девяти европейских странах в период между 1624 и 1889 гг. Обсуждаются возможные технологические причины различий в их составе. Предложены два состава латуней для реставрации старинных органов и производства новых со звучанием, идентичным звучанию инструментов эпохи барокко и романтизма.

Введение

В Европе сохранилось более 10 000 органов, созданных до начала XX столетия. Есть они и в России, хотя и не в таком количестве. Все это время изготовление органов находилось в руках небольших семейных предприятий, где производственные секреты передавались изустно из поколения в поколение.

В истории, однако, было два периода, когда технология изготовления органов резко изменялась. Первый такой рубеж — это конец XVIII—начало XIX вв., время первой индустриализации. Этот период заканчивается появлением первых железных дорог. Паровоз — символ этой эпохи. В это время технологии производства разнообразных материалов претерпели сильнейшие изменения. Потребность промышленности в металлах резко возросла, производство металлов увеличилось в сотни и тысячи раз, а их цена, наоборот, упала. Появились и распространились новые технологии выплавки и очистки металлов, их механической (прокатка, штамповка) и термической обработки. Производители органов — вместе со всей промышленностью — вынуждены были перейти на новые материалы, но производственные приемы еще долго, в течение всего XIX в., сохранялись.

Второй рубеж — это начало XX вв., когда возникло крупное конвейерное производство. Символы этой эпохи — первый "Форд" и швейная машинка "Зингер". Органы тоже стали делать на крупных фабриках, одна из которых и до сих пор

находится в Рочестере (США). Она была основана фирмой Кодак, поставлявшей комплекты оборудования для кинотеатров. В эпоху немое кино вместе с кинопроектором поставляли и музыкальный инструмент для звукового сопровождения "фильмы".

В конце XX в. музыкальное сообщество и профессиональные производители и реставраторы органов пришли к выводу, что звучание старых инструментов, созданных до всех этих событий, а именно — в XVIII, XVII вв., сильно отличается от звучания более поздних органов. Поэтому адекватно исполнить музыку Баха, Букстехуде и более ранних композиторов можно только на инструментах с "правильным" набором труб и соответствующим звуком. А звучание органов эпохи барокко отличается от звучания более поздних инструментов не меньше, чем звук клавесина от звука концертного рояля. При этом старый орган невозможно взять с собой в концертное турне, как скрипку Страдивари или альт Амати. Звук старых органов можно услышать только на месте, то есть в тех костелах и кирхах, где они были установлены в XVIII в. и ранее. Поэтому для органных мастеров возникли две важные рыночные ниши:

а) бережная реставрация старых органов, с сохранением их прежнего звучания,

б) создание новых органов, которые звучали бы так же, как инструменты эпохи барокко. Прежде

всего, для этого нужно было восстановить технологию производства материалов для органов такими, какими эти материалы были в XVIII в. и ранее.

Хотя в конце XVIII в. и появилась своеобразная энциклопедия органного мастерства, написанная францисканским монахом Дом Бедосом [1], но все же значительная часть технологических традиций передавалась в семьях органных мастеров изустно и была утеряна. Поэтому восстановление традиционных технологий требует специальных материаловедческих исследований. Первым успехом на этом пути стало восстановление технологии литья свинцово-оловянных сплавов для органных труб. Однако об этом речь пойдет в другой раз.

В исторических органах присутствуют два типа труб: лабиальные (безязычковые) и язычковые трубы (рис. 1). Лабиальные трубы (рис. 1, а, в) составляют большинство (около 80 %) труб в органе. Они не содержат подвижных деталей. Лабиальные трубы изготовлены обычно из сплавов олова со свинцом (это наиболее крупные трубы на фасаде органа) или свинца с оловом (трубы меньшего размера, с более высоким звуком, находятся внутри органа и не видны за его фасадом). В лабиальной трубе (рис. 1, а) звук возникает в результате удара воздушной струи о нижнюю и верхнюю губу так называемого "ротика" (лабиума), разреза в нижней части трубы. Трение воздушной струи об этот край разреза производит свист, который можно слышать, если отделить трубу от ее мундштука. Труба служит резонатором, она выделяет и усиливает соответствующий ее размерам один из многочисленных тонов, входящих в состав этого сложного свиста.

Язычковые трубы (рис. 1, б, г), кроме резонатора из такого же свинцово-оловянного сплава, как лабиальные трубы, содержат еще и очень важный элемент — колеблющуюся под напором воздуха упругую пластинку — латунный язычок. Именно этот

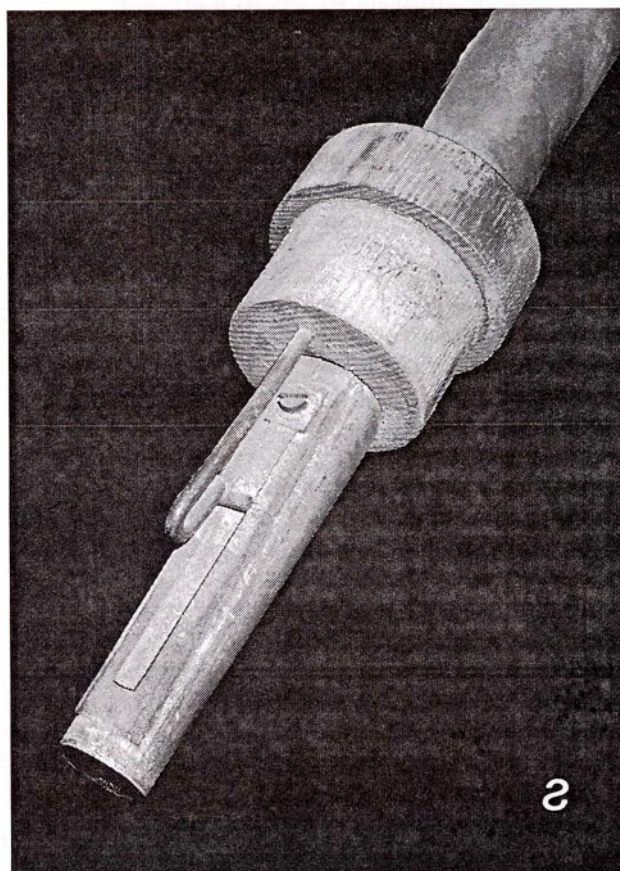
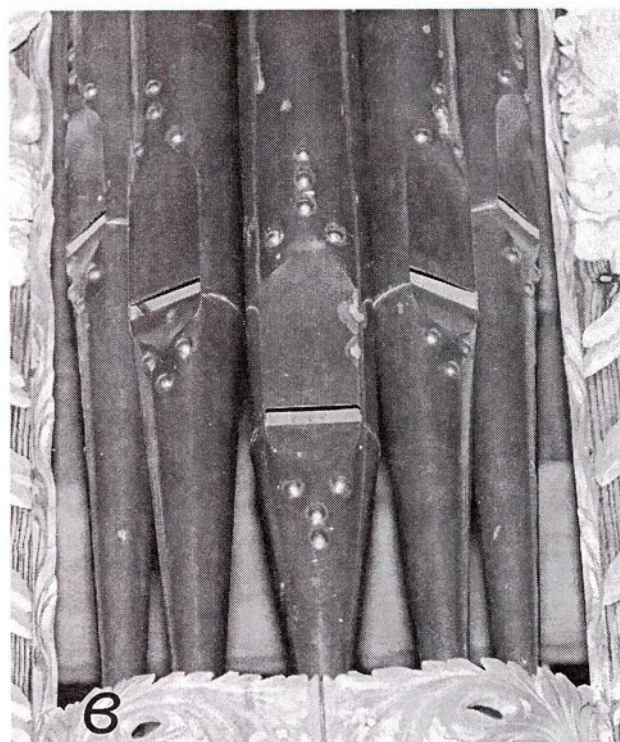
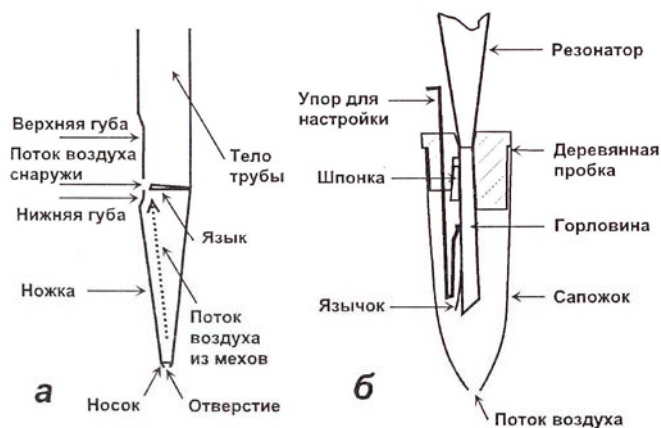


Рис. 1. Схема устройства: а — лабиальных (безязычковых); б — язычковых органных труб; в — лабиальные трубы на фасаде органа в лютеранской церкви в Угалэ (1701 г., Латвия), г — язычковая труба из органа в церкви Святого Духа (францисканской) в Вильнюсе (1703 г., Литва)

язычок и издает звуки в широком интервале частот. Стоячие волны образуются вдуванием воздуха через особое отверстие, прикрываемое язычком, который при этом колеблется. Резонатор язычковой трубы служит своего рода акустическим фильтром, который избирательно усиливает или ослабляет частоты звукового потока от язычка. Звучание язычковых труб намного богаче обертонами, чем звук лабиальных труб. Язычковые трубы составляют обычно не более 20 % всего набора труб в органе. Старые органые мастера сравнивали их звук с приправами к блюдам в кулинарном искусстве. Язычковые регистры делают звучание органа богаче и "острее". Из медного сплава изготовлены и так называемые горловины. И если задача восстановления свинцово-оловянных сплавов для резонаторов была успешно решена к началу XXI столетия, то получение медных сплавов для язычков и горловин оставалось вызовом для материаловедов вплоть до самых последних лет.

Методика эксперимента

Исследование исторических образцов предполагает крайне бережное к ним отношение. Язычки и горловины, временно изъятые для анализа, необходимо вернуть затем на их место в органах. Поэтому методы исследования должны быть неповреждающими. В самом крайнем случае можно было осторожно отполировать небольшой участок поверхности язычка в нерабочей части, которая не участвует в звуковых колебаниях и находится позади настроенного латунного упора. В очень редких случаях можно было отрезать от этого участка совсем кро-

хотный кусочек для анализа. Только в церкви в Угалэ (Латвия) удалось найти несколько полностью непригодных к восстановлению язычков. Из них удалось вырезать образцы для структурных исследований с помощью просвечивающей электронной микроскопии, в том числе — высокого разрешения (микроскоп JEM-4000FX). Морфология поверхности язычков и горловин была изучена с помощью оптической микроскопии (ОМ) (микроскоп Neophot, оборудованный цифровой фотокамерой Canon 6 Мпк) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, JSM 25S). Микроструктура сплавов после осторожной шлифовки и полировки на алмазных пастах зернистостью 6, 3 и 1 мкм изучалась с помощью ОМ и СЭМ. Состав исторических латуней определяли с помощью локального рентгеновского электроннозондового микроанализа, масс-спектропии вторичных ионов (ВИМС, Cameca IMS-4f), химического анализа (оптическая эмиссионная спектроскопия), а также по изменению периода решетки с помощью дифракции рентгеновских лучей (дифрактометр SIEMENS-500).

Результаты

Нам удалось проанализировать состав и структуру латунных язычков и горловин из исторических органов девяти стран: Бельгии, Великобритании, Германии, Италии, Латвии, Литвы, Нидерландов, Франции и Швеции (см. табл.). Эти органы были созданы в интервале от 1624 до 1889 гг. Значения концентрации, полученные разными методами, хорошо воспроизводились, и поэтому в таблице приведены усредненные величины.

Среднее содержание цинка и свинца в исторических латунях

Год изготовления	Церковь или город	Расположение	Органый мастер	Язычок (я) или горловина (г)	Zn, масс. %	Pb, масс. %
1624	Св. Штефан	Тангермюнде, Германия	Ханс Шерер мл.	я г	23,9 ± 2 25,1 ± 0,5	5,5 ± 1 8,5 ± 1
1659		Штральзунд, Германия	Штельваген	я1 я2 г1 г2	27,9 ± 0,5 24,4 ± 0,5 27,6 ± 0,5 27,0 ± 0,5	3 ± 1 3 ± 1 5 ± 1 5 ± 1
1680	Св. Иоанн	Гамбург, Германия	Арп Шнитгер	г		2,0 ± 1
1680?	Францисканская ц.	Кретинга, Литва	Немецкий мастер из Кенигсберга	я г	25,4 ± 0,3 26,8 ± 0,3	0,8 ± 1 0,7 ± 1
1682	Св. Яков	Людингворс (Куксхафен), Германия	Арп Шнитгер	я	25,1 ± 1	3 ± 1
1686	Св. Мартин	Штайнкирхен, Германия	Арп Шнитгер	я	27,3 ± 0,5	2 ± 1
1698	Св. Лаврентий	Дедесдорф, Германия	Арп Шнитгер	я г	23,1 ± 0,5 23,6 ± 0,5	1,3 ± 1 1,8 ± 1
1701	Лютеранская ц.	Угалэ, Латвия	Корнелиус Ранеус	я	22,4 ± 0,5	1,5 ± 1

Продолжение табл.

Год изготовления	Церковь или город	Расположение	Органный мастер	Язычок (я) или горловина (г)	Zn, масс. %	Pb, масс. %
1704	Св. Ботолф	Лондон, Англия	Ренатус Харрис	г	21,7 ± 0,5	2 ± 1
После 1700		Нидерланды	Арп Шнитгер (школа)	г1	26,2 ± 0,5	2,5 ± 1
				г2	25,5 ± 2,5	1,4 ± 0,9
				я	30,9 ± 0,5	1,8 ± 1
1719	Св. Магнус	Анлоо, Нидерланды	Йоханнес Ралекер и Рудольф Гаррелс	я1 я2 я3 г	29,4 ± 0,5 24,1 ± 1 25,9 ± 2,5 23,8 ± 1	2 ± 1 3,9 ± 1 1,1 ± 0,7 4,4 ± 1
1734	Ваальсе Керк	Амстердам, Нидерланды	Кристиан Мюллер	я	26,7 ± 1	1,5 ± 1
1747	Кабинетный орган	Нидерланды	Кристиан Мюллер	я	25,8 ± 1	5,8 ± 1
1754		Оверсело, Швеция	Йохан Грен и Петер Штрале	я	27,3 ± 1	2 ± 1
1750 ± 20		Бельгия		я1	30,8 ± 0,2	1,3 ± 1
				я2	32,3 ± 0,2	1,1 ± 0,5
				я3	31,6 ± 0,1	0,9 ± 0,5
				я4	30,0 ± 0,2	0,3 ± 0,2
				я5	34,7 ± 0,3	0,9 ± 0,5
1750 ± 20	Кастельферретти	Анкона, Италия	Пьетро Наккини	я	32,2 ± 0,5	
После 1750	Касатико	Мантуя, Италия		я	24,4 ± 0,5	
1760	Диакония	Утрехт, Нидерланды	Кристиан или Петер Мюллер	я	25,4 ± 1	5,6 ± 1
1762	Евангел. Лютеранская ц.	Гаага, Нидерланды	И. Х. Х. Бетц	я	24 ± 2	7 ± 2
1776	Св. Духа Доминиканская ц.	Вильнюс, Литва	Адам Готтлоб Каспарини	я1	32,4 ± 1	2 ± 1
				я2	26,4 ± 2,5	0,5 ± 0,3
				г	30,4 ± 0,3	0,5 ± 0,3
1784	Св. Мария	Титувенай, Литва	Николаус Янсен (Янзон)	я	28,6 ± 0,5	2 ± 1
1783	Хасби	Даларна, Швеция	Николаус Зедерштром	я	28,1 ± 0,5	2 ± 1
1800—1830		Бельгия	Коппин	г	34,7 ± 0,3	0,8 ± 0,5
1819	С. Николо	Пьяченца, Италия	Джузеппе Серасси	я	33,3 ± 0,5	2 ± 1
1826		Дотнува, Литва	Модест Микнявичус	я	32,3 ± 0,5	2 ± 1
1841	Собор Сен-Дени	Париж, Франция	Аристид Кавайе-Коль	я	32,8 ± 2,5	0,4 ± 0,3
После 1850		Бельгия	Отбуа	г	33,5 ± 0,3	1,1 ± 0,5
1857	Нивиано	Пьяченца, Италия	Джузеппе Кавалли	я	35,7 ± 0,5	0,01 ± 0,01
1859	Понте дель-Олио	Пьяченца, Италия	Антонио Сангалли	я	33,3 ± 0,5	0,02 ± 0,01
1889	Станьо Ломбардо	(Кремона), Италия	Натале Бальбиали	я	33,2 ± 0,5	0,2 ± 0,2
1880?	Пучиска	о-в Брак, Италия	Москателли	я	34,8 ± 0,2	0,2 ± 0,2

Полученные результаты показывают, что исторические латуни для язычков и горловин содержат три основных компонента: 70—78 масс. % меди, 22—32 масс. % цинка и 0,05—4 масс. % свинца. Все остальные элементы присутствуют в незначительных количествах. Даже в самых старых сплавах XVII в. суммарная концентрация остальных элементов не превышает одного процента, полупроцента — в XVIII в., и еще меньше — в XIX в. На рис. 2 приведена фазовая диаграмма медь—цинк. Видно, что все изученные язычки и горловины представляют собой альфа-латунь, то есть твердый

раствор цинка в меди. Свинец совершенно нерастворим в твердой меди и присутствует в сплавах в виде изолированных частиц разной формы. На рис. 3 показано, как изменяются концентрации цинка и свинца в изученных латунях в зависимости от года изготовления органа. Из рис. 3 хорошо видно, что:

1. Между 1624 и 1790 гг. концентрация цинка остается удивительно постоянной и колеблется возле среднего значения около 26 масс. %, не превышая величины 28 масс. %. Это существенно ниже предельной растворимости цинка в твердом растворе на основе меди.

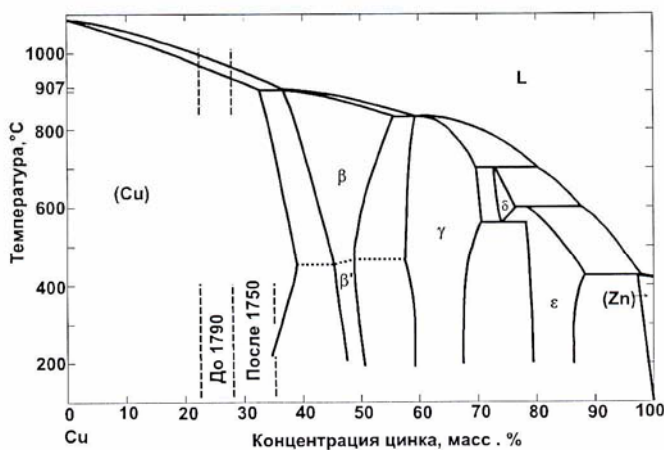


Рис. 2. Фазовая диаграмма медь—цинк [2]

2. После 1790 г. в изученных нами образцах концентрация цинка всегда превышает 30 масс. %. Среднее значение лежит около 32,5 масс. % цинка и тоже колеблется в очень узких пределах. Такие латуни появляются примерно в 1740 г. Переход от латуни со средним значением концентрации цинка 26 масс. % к 32,5 масс. % происходит в относительно короткое время с 1740 по 1790 гг.

3. В латунях, изготовленных между 1624 и 1750 гг., всегда присутствует свинец. Его концентрация постепенно падает со временем, начиная от 7—8 масс. % в начале XVII в. до 2—3 % к концу XVII столетия. Однако еще около 1820 г. встречаются латуни с содержанием свинца в пределах 1—2 масс. %.

4. Начиная с 1750 г. появляются латуни, которые практически не содержат свинца. После 1790 г. органические мастера использовали практически только такие бессвинцовые латуни.

Указанные изменения в концентрации свинца и цинка между 1740 и 1790 гг. практически не зависят от географического происхождения образцов из разных регионов Европы. Между 1740 и 1790 гг. можно найти все четыре сочетания концентраций свинца и цинка:

- а) мало цинка — много свинца,
- б) много цинка — мало свинца,
- в) мало цинка — мало свинца,
- г) много цинка — много свинца.

Обсуждение результатов

Полученные нами необычные результаты можно объяснить, если проанализировать историю технологий производства меди, цинка и латуни. Прежде всего, Дом Бédос сообщает, что органические мастера не изготавливали латуни сами (в отличие от свинцово-оловянных сплавов для труб), а покупали ее на рынке в виде готовых листов или свернутой в рулон ленты [1]. Это связано, несомненно, с высокой температурой выплавки латуни, а также ее

малым количеством (для одного органа нужно менее килограмма латуни). Практически постоянную концентрацию цинка в латуни до 1790 г. можно объяснить тем, что в отличие, скажем, от бронзы (которую применяли для литья колоколов или пушек) латуни до конца XVIII в. производилась не путем сплавления меди и цинка, а способом так называемой цементации. Латуни даже не называли в западноевропейских языках сплавом. Она носила названия вроде "желтой меди" (нем., англ., фр.). Дело в том, что цинк кипит уже при температуре 907 °С, т. е. ниже точки плавления меди. Поэтому при цементации куски чистой меди перемешивались в печи с размельченной цинковой рудой (оксидом или карбонатом) и каменным или древесным углем [3, 4]. Полученная смесь нагревалась, и при температуре выше 907 °С восстановленный из руды цинк испарялся и диффундировал через газовую фазу непосредственно в медь. С помощью цементации невозможно смешивать медь и цинк в произвольных пропорциях, как это было бы при простом сплавлении компонентов. При цементации медь насыщалась цинком до концентрации, определяемой линией солидуса на фазовой диаграмме при температуре процесса (рис. 2), не переходя в расплавленное состояние. Температура процесса должна лежать выше температуры кипения цинка, и максимальная концентрация цинка при цементации поэтому равна примерно 27 масс. %. Цементация при более высоких температурах ведет к более низкому содержанию цинка в латуни (рис. 2), кроме этого, она еще и экономически невыгодна из-за высокого расхода каменного или древесного угля. Поэтому температура процесса лежала в достаточно узком интервале. Несмотря на отсутствие в XVIII в. термопар и пирометров, металлурги могли поддерживать температуру на глаз, по цвету нагретой зоны в пределах ± 10 —20 °С. Узким интервалом температур цементации выше 907 °С определяется и узкий интервал концентраций около 26 масс. % цинка в латунях до 1790 г.

На рис. 4 приведена построенная по данным [5] зависимость концентрации олова и свинца в бронзовых пушках примерно в тот же период времени, к которому относятся изученные нами исторические латуни для органов. Бронза, в отличие от латуни, изготавливалась методом прямого сплавления компонентов. Поэтому хорошо видно, в каких широких пределах колеблется концентрация олова в бронзе (от 3,5 до 14 масс. %). Сравнение рис. 3 и рис. 4 показывает, как сильно отличается поведение главного легирующего компонента (цинка и олова) в латунях, полученных методом цементации, и бронзах, полученных прямым сплавлением компонентов.

Почему в конце XVIII в. концентрация цинка в латунях возросла? Попытки восстановления цинка

из руд по традиционной старой технологии в открытых печах вместе с древесным или каменным углем не приводили до середины XVIII в. к успеху, поскольку восстановленный цинк моментально окислялся в содержащей кислород атмосфере печи. Только в 1730 г. Уильям Чэмпион получил первый патент на способ дистилляции цинка в закрытых печах [3, 4]. Примерно с этого времени появляются и первые латуни с повышенным содержанием цинка: иными словами, цинк появился в виде металла, и обычное легирование начало вытеснять цементацию при производстве латуни. Лишь в 1781 г. появилось первое крупное производство цинка на основе патента Джеймса Эверсона [3, 4]. Начиная с этого момента, из-за низкой экономичности, цементация быстро исчезла как способ производства латуни. Из рис. 3 видно, что после 1790 г. латуней

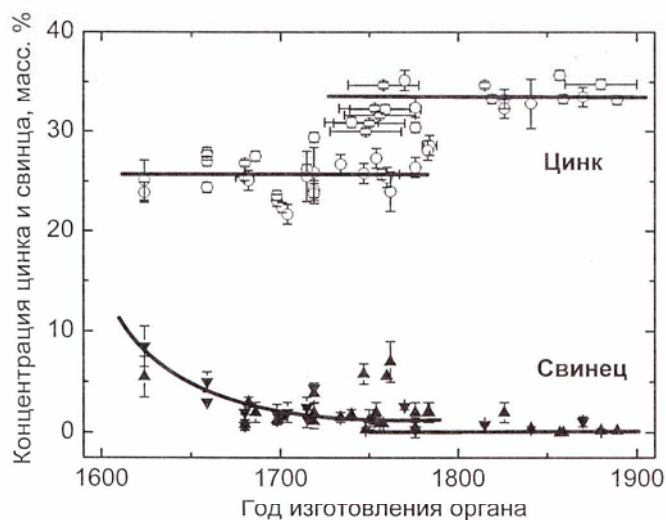


Рис. 3. Концентрация цинка и свинца в изученных исторических латунях в зависимости от года изготовления органа

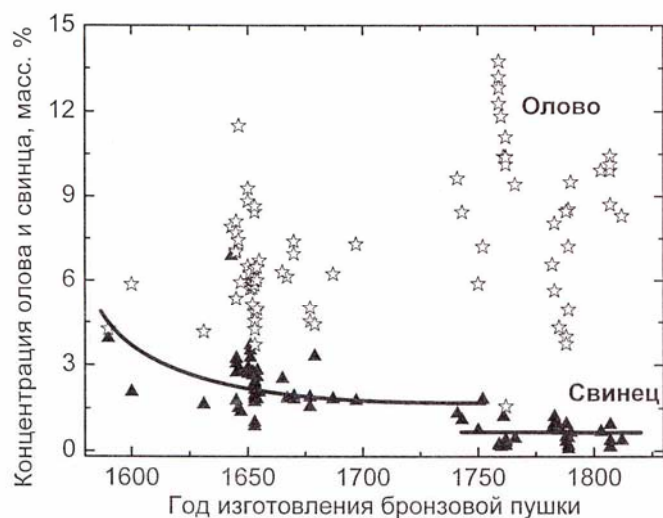


Рис. 4. Концентрация олова и свинца в бронзовых пушках по данным [5]

с низким содержанием цинка уже не встречается в практике органичных мастеров.

Чем определяется концентрация свинца в исторических латунях? Был он случайной примесью или специально добавлялся в материал? Свинец нерастворим в меди и существенно изменяет механические свойства латуни. При добавке свинца латунь становится менее пластичной и приобретает заметную хрупкость. Уже после небольших деформаций латуней, содержащих свинец, требуется промежуточный отжиг для снятия внутренних напряжений, которые могут привести к растрескиванию и разрушению материала. В старых латунях и бронзах (рис. 3 и 4) содержание свинца колеблется от 7 до 2 масс. %. Средняя концентрация свинца постепенно понижается со временем. Исторические источники свидетельствуют, что процессы очистки меди в XVI—начале XVII вв. были еще несовершенны, хотя металлурги всячески старались очистить медь от главных примесей — серебра и свинца [6]. Только в 1685—1688 гг. появилась технология более глубокой очистки меди, в которой вместо древесного угля стали использовать каменный уголь [7]. Из рис. 3 и 4 видно, что после этого времени латуни и бронзы с содержанием свинца более 2—3 масс. уже не встречаются. До конца XVIII в. медеплавильные заводы, как правило, находились неподалеку от месторождений медных руд и работали только на местном сырье. Очистка меди была неглубокой, и поэтому медь из разных производств отличалась по свойствам. Ремесленникам в XVII—XVIII вв., конечно же, был неизвестен точный химический состав меди, но они хорошо знали, чем отличаются свойства меди, например, из Сванси в Британии, Фалуна в Швеции или Гослара в Германии, и умело эти отличия использовали. Химический анализ латуни с помощью ВИМС показал, что содержание остаточных примесей может служить своеобразным маркером меди из разных месторождений.

В конце XVIII в. объемы производства меди резко возрастают. Огромные медеплавильные заводы (вначале — в Британии, а затем и на континенте) начинают строить возле портов, а не возле месторождений, и они переходят на более дешевое привозное сырье со всего мира [3]. Поэтому появляется и технология более глубокой очистки меди, которая позволила производить металл одинаковой чистоты (и с одинаковыми свойствами) из любой руды. Такой многоступенчатый процесс появился в конце XVIII в., он позволял очищать медь от большинства примесей, таких как олово, свинец, серебро, железо [3].

Из рис. 3 и 4 видно, что содержание свинца в латунях для органов и бронзе для пушек изменяется сходным образом. Это — убедительное свидетельство в пользу того, что (а) свинец попадал в латуни

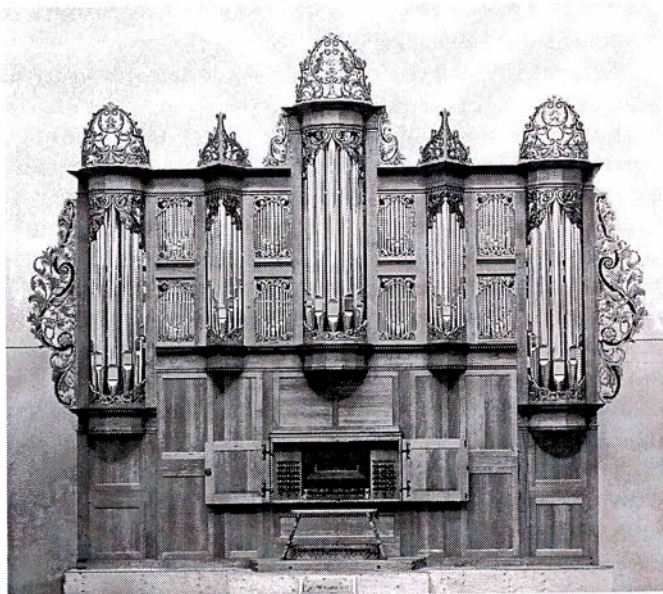


Рис. 5. Новый орган с барочным звучанием в Корейском национальном университете искусств в Сеуле (2006 г., Ю. Корея)

и бронзы главным образом из меди и (б) свинец не добавляли в бронзу и латунь специально, он был нежелательной примесью, от которой старались избавиться, насколько позволяла технология очистки. Действительно: требования к бронзам и латуням были совершенно разными, а концентрация свинца меняется в них по годам одинаково.

Выводы

1. Для адекватной реставрации язычков и горловин в органах, произведенных до 1760 г., следует использовать латунь с содержанием 24–26 масс. % цинка и 1–3 масс. % свинца (органный латунь 1). Независимо от причины, почему свинец присутствует в старых латунях, его концентрацией до 1760 г. нельзя пренебречь. Свинец существенно изменяет механические свойства латуни и, если придерживаться концепции точного восстановления исторических материалов, его обязательно нужно добавлять в латунь, имитирующую материал XVII–начала XVIII вв.

2. Если орган изготовлен после 1800 г., для его адекватной реставрации следует использовать бессвинцовые латуни с содержанием цинка 28–31 масс. % (органный латунь 2).

3. В переходный период между 1760 и 1800 гг. возможны все четыре комбинации концентраций

цинка и свинца (как отмечалось выше). Для этого периода наивысшего расцвета стиля барокко необходимы дополнительные исследования, которые позволят пролить свет на распространение в Европе латуней разного состава.

4. Все остальные элементы, такие как олово, железо и серебро, встречаются в исторических латунях в незначительных количествах и не влияют на свойства латуней. Поэтому нет необходимости добавлять их в новые сплавы для реставрации.

Язычки из сплавов, изготовленных на основе полученных нами результатов, уже установлены после реставрации органов в церкви Св. Магнуса в Анлоо (1719 г., Нидерланды), в лютеранской церкви в Угалэ (1701 г., Латвия), в францисканском костеле Св. Духа в Вильнюсе (1703 г., Литва), а также в новых органах, созданных в стиле барокко по воссозданным технологиям, в церкви Оргрите Ниа Кирка в Гетеборге (2001 г., Швеция), в церкви кальвинистской общины в Райсене (2006 г., Нидерланды), в Токийском университете (2005 г., Япония), в Корейском национальном университете искусств в Сеуле (2006 г. Ю. Корея, рис. 5).

Авторы благодарят органных мастеров Матса Арвидсона, Кристиана Вегшайдера, Римантаса Гучаса, Мунетаку Йокоту, Марко Фратти и Хенка ван Эжена за дружескую поддержку и предоставленные образцы. Мы благодарны за финансовую поддержку проектам ЕС TRUESOUND (контракт COOP-CT-2004-005876) и ИНТАС (контракт 05-1000008-8120).

Список литературы

1. **Dom François Bedos de Celles.** L'art du facteur d'orgues. Bordeaux: Académie Royale des Sciences, 1766.
2. **Massalski T. B. et al., editors.** Binary alloy phase diagrams. Materials Park, OH: ASM International, 1993.
3. **Alexander W. O.** A Brief Review of the Development of the Copper, Zinc and Brass Industries in Great Britain from AD 1500 to 1900 // Murex Review. 1955. V. 1. N 15. P. 1–15.
4. **Day J.** Copper, Zinc and Brass Production // In: The Industrial Revolution in Metals / J. Day & R. F. Tylecote (eds.). London: Institute of Materials. 1991. P. 131–200.
5. **Forshell H.** The inception of copper mining in Falun // Edsbruk: Akademiträck AB, 1992. 333 p.
6. **Agricola G. (Pawer G.)** De Re Metallica // Basel: Froben. 1556. 255 p.
7. **Jenkins R.** Copper smelting. Revival at the End of the 17th Century // Trans. Bristol & Gloucestershire Arch. Soc. 1946. V. 66. P. 63.