

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ЛИТЫХ ТОПОРОВ БРОНЗОВОГО ВЕКА

Работа выполнена группой специалистов из института Вейцмана, ядерного центра Сорек и Управления Древностей (Израиль) и из лаборатории Резерфорда – Апплтона (Великобритания) под руководством профессора Хайфского университета Сариеля Шалева.

На территории Канаана использовались около 4 тысяч лет назад в качестве боевого оружия топоры различной формы, большей частью неизвестные в Европе (рис. 1 - 3).



Рис. 1 Бронзовый топор из Канаана т.н. глазастой формы (eye axe), ширина – 114 мм.

Датирован 2200 – 2000 г.г. до РХ.

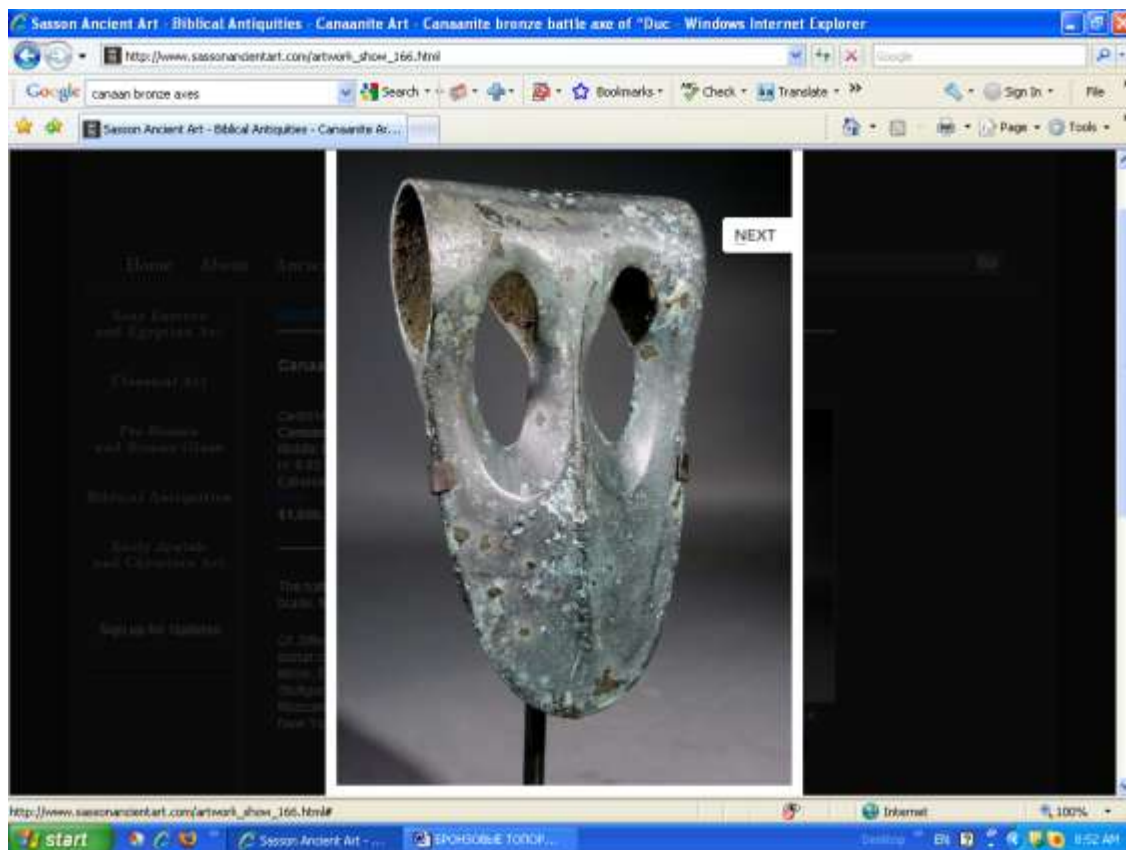


Рис. 2. Бронзовый топор из Канаана т.н. формы утиного носа, ширина 98 мм.  
Датирован 2000 – 1750 г.г. до РХ.



Рис. 3. Бронзовый топор из Канаана долотообразной формы, длина 120 мм.  
Датирован 2200 – 2000 г.г. до РХ (в музейном описании отмечено, что найден в  
Хевроне и относится к временам праотца Авраама).

Из литературы известно, что к этому времени технология изготовления литых изделий достигла высокого уровня, о чем свидетельствует, в частности, весьма совершенная

форма этих топоров. Основными сплавами были мышьяковистая и оловянная бронза, которые по своим механическим свойствам значительно превосходят медь. Первый сплав мог быть получен случайно, так как медные руды нередко содержат мышьяк. Олово же в медных рудах не присутствует, его месторождения редки, так что оловянная бронза могла быть только результатом целенаправленного поиска.

В 2001 г. при раскопках могил кладбища ранне-бронзового века в Енот Шуни (55 км к северу от Тель-Авива) были найдены два «глазастых» топора: редкий бронзовый топор и уникальный серебряный (впервые на территории Израиля). Оба были покрыты продуктами коррозии (рис. 4).



Рис. 4. Серебряный (а) и бронзовый (б) топоры из Енот Шуни

Вначале методом рентгеновского флуоресцентного анализа было установлено, что первый топор изготовлен из сплава серебра с медью (ее обычно добавляют к серебру для повышения твердости), а второй – из оловянной бронзы. Но рентгеновское исследование дает информацию только о слоях, близких к поверхности, не глубже десятков микрон). Для неразрушающего исследования всего топора требуется использование проникающего излучения. Поэтому эти топоры были исследованы в ядерном центре Сорек методами нейтронной радиографии (просвечивания) и нейтронной дифракции (для получения информации о фазовом составе и кристаллической структуре в объеме объектов).

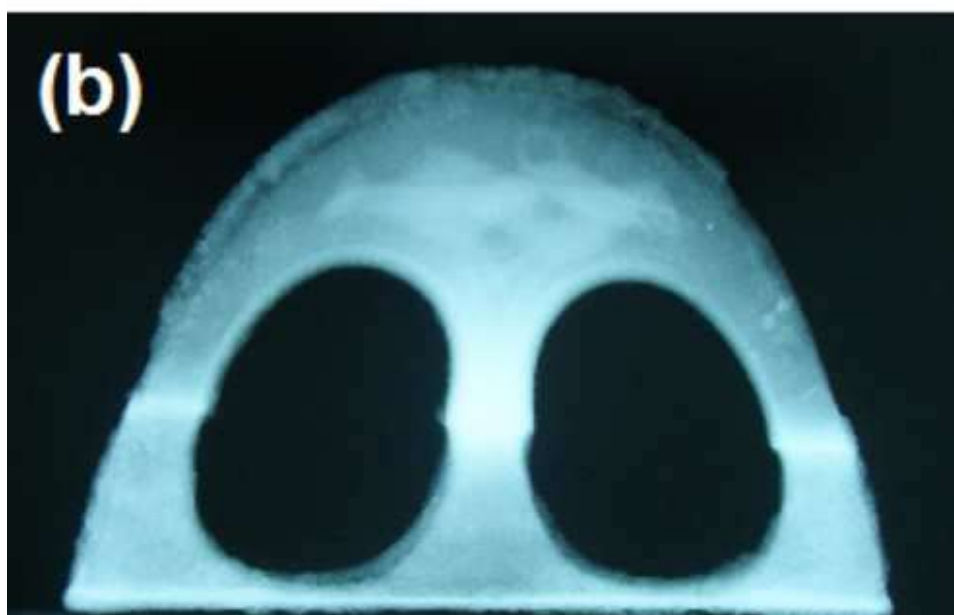
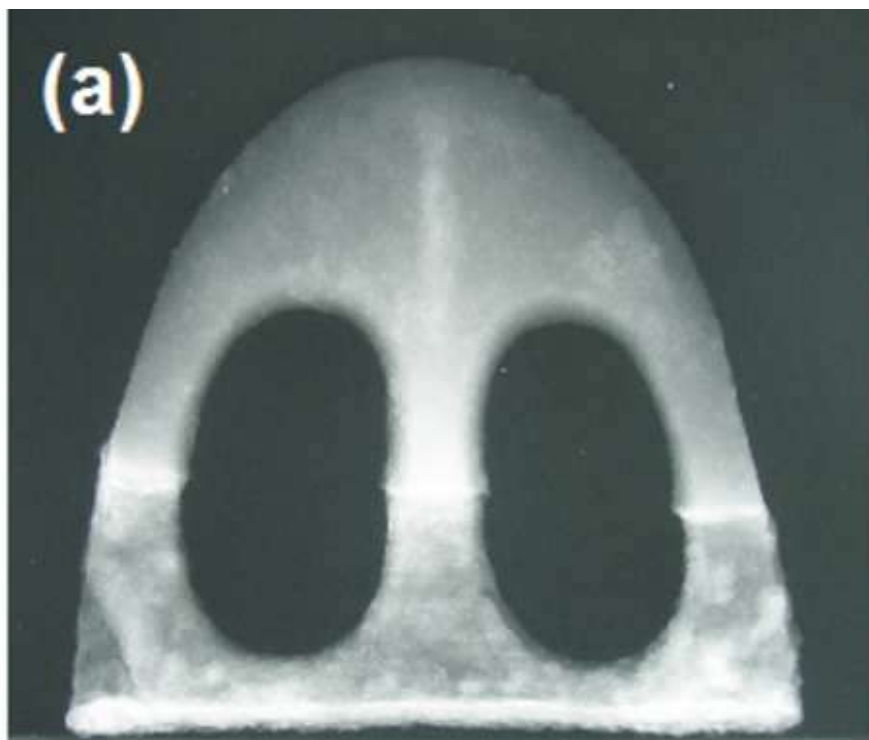


Рис. 5. Картины нейтронного просвечивания бронзового (а) и серебряного (б) топоров.

Судя по этим картинам, металл в основном объеме сохранился. Более того, под продуктами коррозии серебряного топора различимы две фигуры животных. Картина дифракции нейтронов для этого топора свидетельствует о наличии наряду с продуктами коррозии твердого раствора меди в серебре с периодом решетки, не сильно отличающимся от периода решетки серебра, т.е. содержание меди невелико. После завершения нейтронного исследования этот топор был подвергнут очистке от продуктов коррозии, и на его поверхностях вблизи лезвия появились изображения собаки и овцы весьма высокого качества (Рис.6).



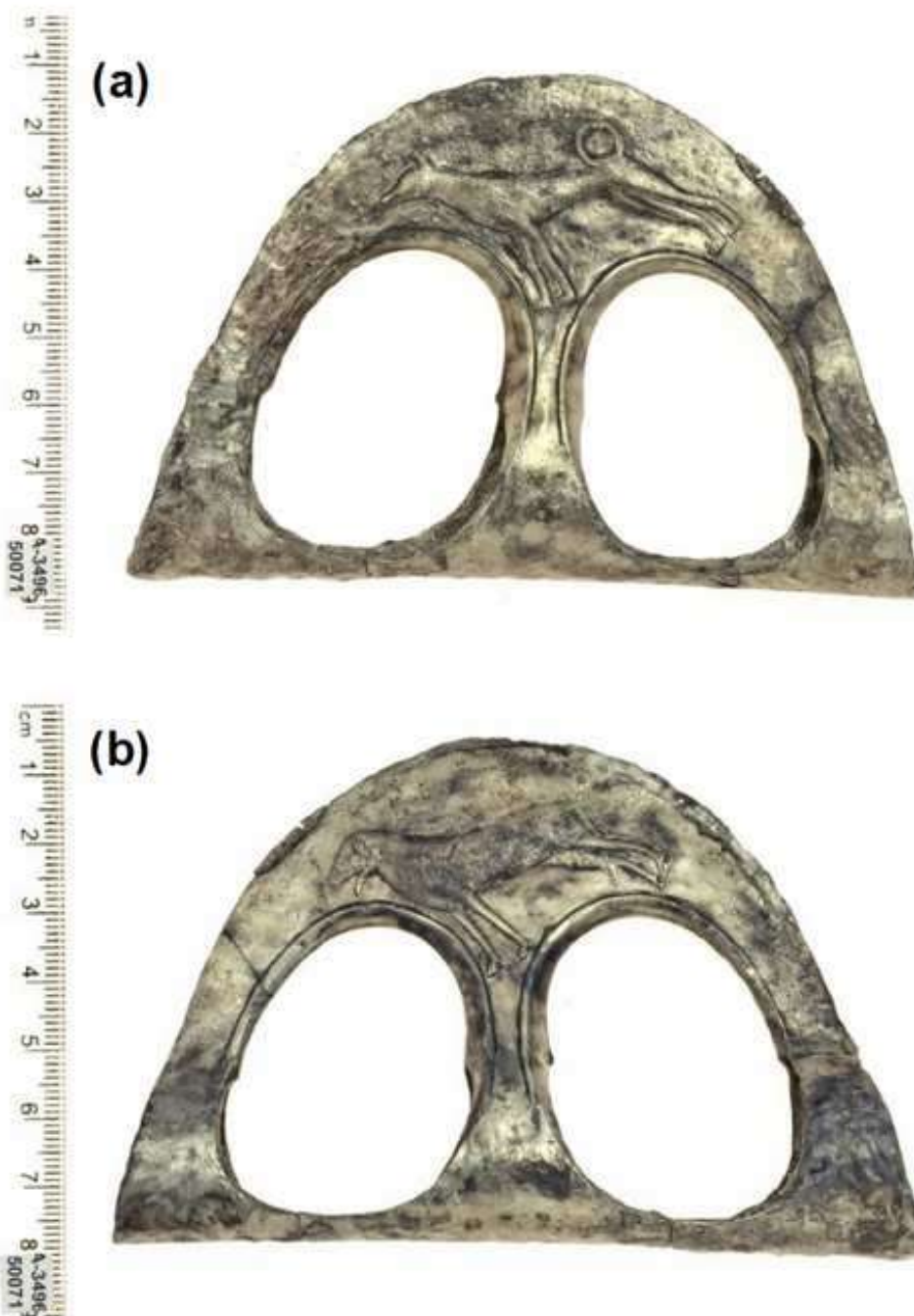


Рис. 6. Серебряный топор в очищенном виде.

Картина нейтронной дифракции бронзового топора свидетельствует о наличии наряду с продуктами коррозии твердого раствора олова в меди (с концентрацией около 8%). При этом дифракционные линии твердого раствора сильно уширены, что указывает на его неоднородность. Такая ситуация является обычной для литых объектов – температуры плавления меди и олова сильно отличаются, поэтому сначала затвердевает раствор, сильно обедненный оловом, и по мере роста кристаллов (т.н. дендритов) вглубь от поверхности

содержание олова в них возрастает. Дендритная ликвация приводит к неоднородности механических свойств изделия, и для ее устранения необходима дополнительная термическая обработка. В данном случае, мастера ограничились верной рецептурой бронзы и не довели ее до состояния, оптимального для приготовления достаточного твердого и прочного лезвия.

По-видимому, «глазастые» топоры, найденные в Енот Шуни, были символами статуса, а не настоящим оружием, тем более что серебряный топор для этого недостаточно тверд.

В 1991 - 1998 г.г. при раскопках могил кладбища бронзового века в Ришон Ле-Ционе были найдены многочисленные образцы оружия, кинжалов, копий и топоров, датированные серединой бронзового века (2000 – 1800 г.г. до РХ). Из них были выбраны для детального исследования 6 бронзовых топоров. Сначала их состав был определен методом рентгеновского флюоресцентного анализа, оказалось, что 4 из них отлиты из оловянной бронзы и два – из мышьяковистой, концентрация олова или мышьяка близка к оптимальной. Во всех топорах была обнаружена значительная пространственная неоднородность состава приповерхностных слоев, как по основной упрочняющей примеси (олово или мышьяк), так и по свинцу. При этом содержание свинца в некоторых случаях достигало 20%, что не приемлемо для достижения механических свойств, необходимых для оружия. Требовалось установить, каков реальный состав и какова внутренняя структура топоров в их объеме. Исследование методом дифракции нейтронов было проведено на дифрактометре ENGIN-X с высокой светосилой и разрешением, позволяющими проводить локальное изучение объема порядка  $0,2 \text{ см}^3$ , на одном из лучших современных источников нейтронов ISIS в Великобритании. Центральная часть каждого из топоров сканировалась с шагом в несколько миллиметров, для получения информации о составе и структуре каждого участка образца. Топоры были установлены на столе дифрактометра (рис. 7), и автоматическое сканирование каждого из них проводилось по программе в течение нескольких часов.



Рис. 7. Топоры середины бронзового века: вверху слева – топор типа «утиный нос» (оловянная бронза), слева в центре и внизу – топоры типа долота (мышьяковистая бронза), справа – топоры типа долота (оловянная бронза), длина долотообразных топоров – от 102 до 165 мм. Размер исследуемого объема в центре объекта – 4x4x10 мм.

На картинах нейтронной дифракции наблюдались сильные линии твердых растворов Cu-Sn или Cu-As, а также очень слабые линии свинца. Отсутствие линий соединений меди с оловом или мышьяком показывает, что состав сплава близок к оптимальному. Содержание свинца в объеме топоров не превышает 2-3%, т.е. в точности соответствует тому, которое необходимо для достижения жидкотекучести без ущерба для механических свойств изделия. В массивной части каждого топора линии твердого раствора уширены, в соответствии с ликвацией литья. Такую картину можно описать как два твердых раствора с разным содержанием олова и, соответственно, с разными периодами кристаллической решетки. Однако, в части топоров, близкой к лезвию, это уширение отсутствует, что соответствует однородному раствору определенной концентрации (рис. 8).

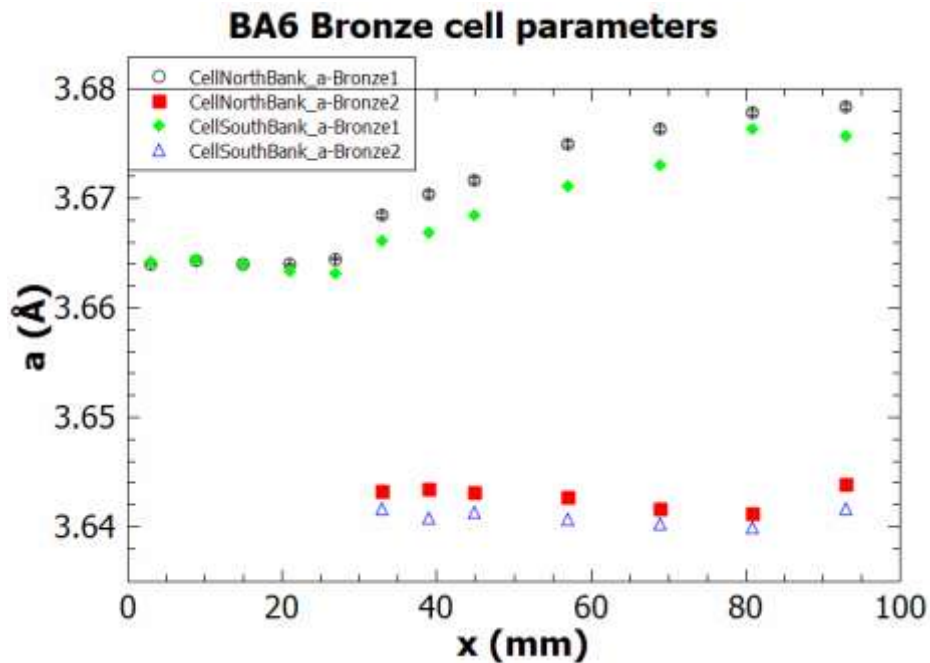


Рис. 8. Изменение периода решетки (и концентрации) твердого раствора с расстоянием от лезвия на примере одного из долотообразных топоров из оловянной бронзы.

Для достижения такой однородной структуры необходимо провести дополнительный локальный отжиг, для обеспечения достаточно активной диффузии атомов. В результате прилегающая к лезвию часть топора становится пригодной для дополнительного упрочнения ковкой перед заточкой лезвия. Таким образом, мы получили демонстрацию полного цикла изготовления литого изделия: обеспечение оптимального состава, а затем оптимальной локальной термообработки. Эти топоры были, вероятно, вполне готовы к применению в качестве боевого оружия.

Неоднородность приповерхностных слоев и их обогащение свинцом связаны с особенностями их строения, обусловленными процессами коррозии и химической обработкой при консервации.

Таким образом, с помощью современного метода дифракции нейтронов удалось подтвердить, что древние мастера уже 4 тысячи лет назад полностью владели секретами производства высококачественных литых изделий из бронзы.

С.Ш. Шильштейн