

Topias Valkonen

**MUINAISIIN TYÖKALUIHIN JA ASEISIIN
SOVELLETUN METALLURGIAN
KEHITYS KUPARIKAUDELTA
RAUTAKAUDELLE**

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Johanna Ruoranen

Lokakuu 2021

TIIVISTELMÄ

Topias Valkonen: Muinaisiin työkaluihin ja aseisiin sovelletun metallurgian kehitys kuparikaudelta rautakaudelle
Tampereen yliopisto
Materiaalitekniikan tutkinto-ohjelma
Kandidaatintyö
Lokakuu 2021

Metallit ovat olleet kautta historian keskeisessä osassa ihmiskunnan teknologisessa kehityksessä. Ihmiskunnan historia on perinteisesti jaoteltu aikakausiin sen mukaisesti, mitä materiaaleja on pääasiassa käytetty työkalujen ja aseiden valmistukseen. Kivikauden jälkeisenä esihistoriallisena aikana nämä materiaalit ovat olleet kupari, pronssi ja rauta. Kandidaatintyössä tarkastellaan, miten siirtymät näiden työkaluihin ja aseisiin käytettyjen metallien välillä ovat tapahtuneet, mitkä tekijät ovat vaikuttaneet näihin siirtymiin ja miten uudet metallit ovat vaikuttaneet ihmiskunnan käyttämiin työkaluihin, aseisiin ja niiden valmistusmenetelmiin.

Keskeisimmät tekijät, jotka ovat vaikuttaneet siirtymiin metallien välillä ovat metallien mekaaniset ominaisuudet sekä niiden valmistamiseen tarvittavien raaka-aineiden saatavuus. Metallien väliset siirtymät eivät ole olleet äkkinäisiä, vaan vanhoja ja uusia metalleja on usein käytetty rinnakkain vuosisatojen ajan. Uusien metallien myötä aseiden ja työkalujen mekaaniset ominaisuudet ovat parantuneet merkittävästi, millä on ollut laajoja vaikutuksia muinaisiin yhteiskuntiin esimerkiksi maanviljelyn ja sodankäynnin kannalta.

Hyödyntääkseen uusia metalleja ihmiskunnan on pitänyt kehittää uusia metallinvalmistusmenetelmiä, jotka ovat mahdollistaneet paitsi uusien metallien käytön, myös uudenlaisten esineiden valmistuksen. Ihmiskunnan tietämys metalleista on karttunut jatkuvasti vuosituhansien ajan, ja sekä muinaiset että nykyiset metallurgit ovat hyödyntäneet tätä tietämystä kehittäessään entistä edistyksellisempiä metallinvalmistustekniikoita. Nykyihmiset hyödyntävät samoja metalleja kuin ihmiset vuosisatoja sitten, vaikkakin osittain eri käyttökohteissa ja jatkuvasti kehittyvin menetelmin.

Avainsanat: kuparikausi, pronssikausi, rautakausi, metallurgia

SISÄLLYS

1. JOHDANTO	1
2. METALLIEN KÄYTÖN ALKUVAIHEET JA METALLURGIAN LEVIÄMINEN	3
3. KUPARIKAUSI	5
3.1 Kuparin valmistus	5
3.2 Kupariset aseet ja työkalut	8
4. PRONSSIKAUSI	10
4.1 Pronssin valmistus	11
4.2 Pronssiset aseet ja työkalut	12
5. RAUTAKAUSI	16
5.1 Raudan valmistus	18
5.2 Rautaiset aseet ja työkalut	20
6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	22
LÄHTEET	25

LYHENTEET JA MERKINNÄT

°C	celsiusaste
As	arseeni
bluumi	engl. bloom, varhaisen raudanvalmistusprosessin tuloksena syntyvä huokoinen kappale, joka sisältää raudan lisäksi paljon epäpuhtauksia
Cu	kupari
CuO	kuparioksidi, kuparin ja hapen yhdiste
ea.	ennen ajanlaskun alkua
korroosio	materiaalin syöpyminen kemiallisten reaktioiden seurauksena
mm	millimetri
muokkauslujittuminen	materiaalin lujuuden tai kovuuden nouseminen mekaanisen työstämisen seurauksena
O	happi
pelkistäminen	metallin erottaminen malmista kemiallisten reaktioiden avulla mahdollisimman hyvin alkuperäistä vastaava kopio
rekonstruktio	historiallisesta esineestä
Sn	tina
SnO	kassiteriitti, tinan ja hapen yhdiste

1. JOHDANTO

Metallurgian varhaisesta keksimisestä asti metallit ovat olleet keskeisessä osassa ihmiskunnan kehityksessä. Metallien keskeistä asemaa kuvaa hyvin esimerkiksi se, että ihmiskunnan esihistoria on jaoteltu aikakausiin sen mukaisesti, mitä mineraaleja on pääasiassa hyödynnetty työkalujen ja aseiden valmistuksessa. Ihmiskunnan esihistoria jaotellaan tyypillisesti kivikauteen, pronssikauteen ja rautakauteen. Joskus tässä jaottelussa on mukana myös pronssikautta edeltänyt kalkoliittinen kausi eli kuparikausi.

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan metallisten aseiden ja työkalujen sekä niiden valmistusmenetelmien kehittymistä kuparikauden alusta rautakaudelle. Tutkimuskysymyksinä työssä ovat seuraavat:

1. Miten ihmiskunta on siirtynyt käyttämään eri metalleja työkaluissa ja aseissa ja mitkä tekijät edesauttoivat näitä siirtymiä?
2. Miten nämä siirtymät metallien välillä vaikuttivat työkaluihin, aseisiin ja niiden valmistusprosesseihin?

Työssä keskitytään käsittelemään niitä metalleja, joita yleisimmin käytettiin työkalujen ja metallien raaka-aineena: kuparia ja sen seoksia, erityisesti tinapronssia, sekä rautaa. Työssä keskitytään työkaluihin ja aseisiin, sillä näiden välineiden kehittyminen on keskeisiä mittareita, joiden avulla voidaan tarkastella ihmiskunnan teknologista kehitystä. Ajallisesti työ rajataan käsittelemään kuparikauden alun ja rautakauden alun välistä ajanjaksoa.

Aseiden ja työkalujen hyödyllisyyteen ja käytettävyyteen vaikuttavat useat tekijät. Leikkaavien aseiden ja työkalujen tapauksessa niiden terävyyteen vaikuttaa materiaalin kovuus. Materiaalilta vaaditaan kuitenkin myös riittävää sitkeyttä, sillä liian hauras työkalu tai ase rikkoutuu helposti eikä siten ole käyttökelpoinen. Liian pehmeästä materiaalista valmistettu työkalu tai ase ei myöskään ole hyödyllinen, sillä liian pehmeä materiaali muokkautuu liikaa käytössä. Ideaalisesti aseilta ja työkaluilta vaaditaan sopivaa tasapainoa kovuuden ja sitkeyden suhteen. [1, s. 11] Monissa metalleissa

yhdistyvät riittävä kovuus ja sitkeys, minkä vuoksi metallit soveltuvat hyvin aseiden ja työkalujen valmistukseen.

Eri metallien välillä on kuitenkin merkittäviä eroja esimerkiksi mekaanisissa ja termodynaamisissa ominaisuuksissa, mitkä vaikuttavat niiden käytettävyyteen eri sovellutuksissa. Tämän vuoksi voidaan olettaa, että metallista toiseen siirtymisellä on ollut huomattavia vaikutuksia työkalujen ja aseiden ominaisuuksiin sekä niiden valmistuksessa hyödynnettävien metallurgisten prosessien kehittymiseen.

2. METALLIEN KÄYTÖN ALKUVAIHEET JA METALLURGIAN LEVIÄMINEN

Kuparia on käytetty jo hyvin varhaisista ajoista lähtien ihmiskunnan historiassa. Vanhin tunnettu työstetty kupariesine on peräisin noin vuodelta 7000 eaa. nykyisen Irakin alueelta [2, katso 3, s. 2]. Syitä kuparin aikaiseen ja laajaan käyttöönottoon on useita. Kupari esiintyy luonnossa yleisesti natiivissa eli puhtaassa muodossa. Tämän vuoksi sen käyttöönottoon ei vaadittu malmin pelkistämiseen tai metallin sulattamiseen vaadittavaa teknologiaa tai taitoa ja kupariesiintymiä on pystytty hyödyntämään suhteellisen helposti. Lisäksi kupari on suhteellisen pehmeää ja sitkeää, joten sitä on mahdollista muokata ja siitä on mahdollista valmistaa yksinkertaisia esineitä jopa ilman kuumentamista. [1, s. 5]

Tulenteon keksiminen on ollut tärkeä edellytys metallurgian kehitykselle, sillä tulen käyttö on mahdollistanut metallien pelkistuksen malmeista [4, s. 12]. Tulen käytön myötä mahdolliseksi on tullut myös metallien hehkutus, minkä avulla on voitu uudelleen pehmentää kylmämuokattua metallia ja tehdä siitä vähemmän haurasta [1, s. 5].

On päätelty, että metallien sulattaminen olisi saanut alkunsa keraamien polttoon käytetyissä uuneissa [1, s. 3] [3, s. 3]. Puhtaan kuparin sulamislämpötila, 1 083 °C, on mahdollista saavuttaa puuhiiliuunissa [1, s. 5]. Metallurgian kehittyminen rinnakkain keramiikan kanssa on loogista, sillä keraamien polttoon käytettyjä uuneja on voitu soveltaa malmien pelkistämiseen tai metallien sulattamiseen ja toisaalta metallien sulattamiseen tarvittavia upokkaita ei ole voitu valmistaa ilman keramiikan taitamista [1, s. 7]. On myös esitetty, että metallien pelkistäminen olisi keksitty sattumalta, kun nuotiota varten olisi valittu metallia sisältäviä kiviä ja kivien sisältämä metalli olisi sulanut ja kerääntynyt nuotion pohjalle [4, s. 12].

Metallien laaja käyttöönotto on vaatinut ihmiseltä monimutkaisia kommunikointitaitoja, sillä siirtääkseen tietoa metallinvalmistustekniikoista sepältä ja yhteisöltä toiselle ihmisten on pitänyt kyetä antamaan ja seuraamaan yksityiskohtaisia ohjeita. Vaadittavia taitoja olivat esimerkiksi oikeiden raaka-aineiden valinta, työvaiheiden oikea ajoitus ja järjestys, oikeiden olosuhteiden aikaansaanti ja ylläpitäminen sekä mahdollisten lisäaineiden lisääminen. Lisäksi yksinkertaisimmissakin tekniikoissa virhemarginaalit ovat suhteellisen pieniä, joten yksityiskohtainen tiedonkulku on ollut tarpeellista

metallinvalmistustekniikoiden leviämisen kannalta. [5] Metallurgisten taitojen siirtäminen yksilöltä toiselle on todennäköisesti vaatinut tarkoituksellista ja pitkäjänteistä opettamista, minkä vuoksi metallurginen tietotaito on luultavasti pitkään säilynyt vain verrattain pienen ihmisjoukon käytössä [6].

Metallien käyttöönottoon vaaditaan hyvin syvällistä tietoa ja taitoa, esimerkiksi keraamien valmistuksesta upokkaita, muotteja ja uuneja varten sekä esimerkiksi lämpötilan ja reaktioaikojen hallintaan. Erikoistunutta taitoa tarvitaan myös metallien pelkistyksen jälkeisiin toimenpiteisiin epäpuhtauksien poistamiseksi ja valmiin metalliesineen saamiseksi halutunlaiseksi muodoltaan ja ominaisuuksiltaan. [5]

Metallien käytön omaksumiseen on vaadittu myös ympäröivien yhteisöjen tuki, sillä metallien tuotanto vaatii paljon resursseja [6]. Malmien louhinta, polttoaineen kerääminen ja valmistelu vaativat paljon työvoimaa. Lisäksi yhteisön oli annettava ruokaa näille käsityöläisille, jotka eivät itse suoraan osallistuneet ruuan tuotantoon. Yhteisöön kuuluvat ihmiset myös antoivat syyn metallien tuotannolle ja kaupalle toimimalla metallista valmistettujen tuotteiden käyttäjinä ja ostovoimana. [5] Ihmisyhteisöjen sitoutuminen metallien tuotantoon on siis ollut kriittinen tekijä, joka on mahdollistanut metallurgian käyttöönoton ja leviämisen [6].

Metallurgisia taitoja omaavien yhteisöjen liikkuminen uusille alueille ja uusien metallinkäyttöä tukevien yhteisöjen pariin edesauttoi metallurgisten taitojen vähittäistä levittäytymistä [5]. Metallurgia levisi ympäri Lähi-itää ja Eurooppaa vuosituhansien saatossa, noin 4500 eaa.–2000 eaa. välisenä aikana [3, ss. 11–14]. Metallurgian leviäminen Euraasiassa alkoi Lähi-idästä ja jatkui sieltä ensin läntiseen Aasiaan sekä eteläiseen ja itäiseen Eurooppaan ja myöhemmin Länsi- ja Pohjois-Eurooppaan [5].

3. KUPARIKAUSI

Kalkoliittinen kausi eli kuparikausi on pronssikautta edeltävä ajanjakso, jolloin metallien valmistustekniikat alun perin kehittyivät. Kalkoliittinen kausi sijoittuu noin 5000 eaa. – 3000 eaa. väliselle ajalle. Kalkoliittisella kaudella kuparin, ja myöhemmin kuparin seosten, käyttö aloittivat metallurgian kehityksen. [7, s. 73] Kalkoliittisella kaudella kuparia käytettiin lähinnä pienten esineiden kuten helmien, neulojen, naskalien ja myöhemmin veitsien ja tikarien valmistukseen [3, s. 8].

Kuparin lähteenä alettiin vähitellen käyttää puhtaiden esiintymien lisäksi kuparia sisältäviä malmeja. Malmin pelkistyksen keksiminen oli merkittävä edistysaskel, sillä se lisäsi huomattavasti ihmiskunnan saatavilla olevan kuparin määrää. [7, s. 75] Malmin pelkistyksen myötä myös muut metallit, jotka eivät esiinny natiivissa muodossa, tulivat ihmisille mahdolliseksi käyttää. Kuparin pelkistäminen upokkaassa on kehittynyt itsenäisesti ja toisistaan riippumatta useissa eri paikoissa 5000 eaa. ja 2000 eaa. välisenä aikana: Iranin ylängöllä, pohjoisella Eufratilla, Balkanin niemimaalla, Keski-Euroopassa, Thaimaassa ja Etelä-Amerikassa [8].

3.1 Kuparin valmistus

Kuparin pelkistäminen upokkaassa on varhaisin kuparinvalmistusmetodi. Tätä kehittyneempi valmistusmenetelmä on pelkistäminen uunissa. Upokaspelkistyksessä lämmönlähde on upokkaan ympärillä, uunipelkistyksessä uunin sisällä. Uunissa pelkistämällä voitiin saada kuparia myös huonompilaatuisesta malmista ja pystyttiin pelkistämään enemmän kuparia kerralla. Puuhiiltä käytettiin kuparimalmin pelkistyksessä lämmönlähteenä, mutta myös tuottamaan hiilimonoksidia, joka toimii prosessissa pelkistimenä. [8] (8) Kuvassa 1 on rekonstruktio uunista, jollaista olisi voitu käyttää kuparin valmistuksessa [1, s. 7].



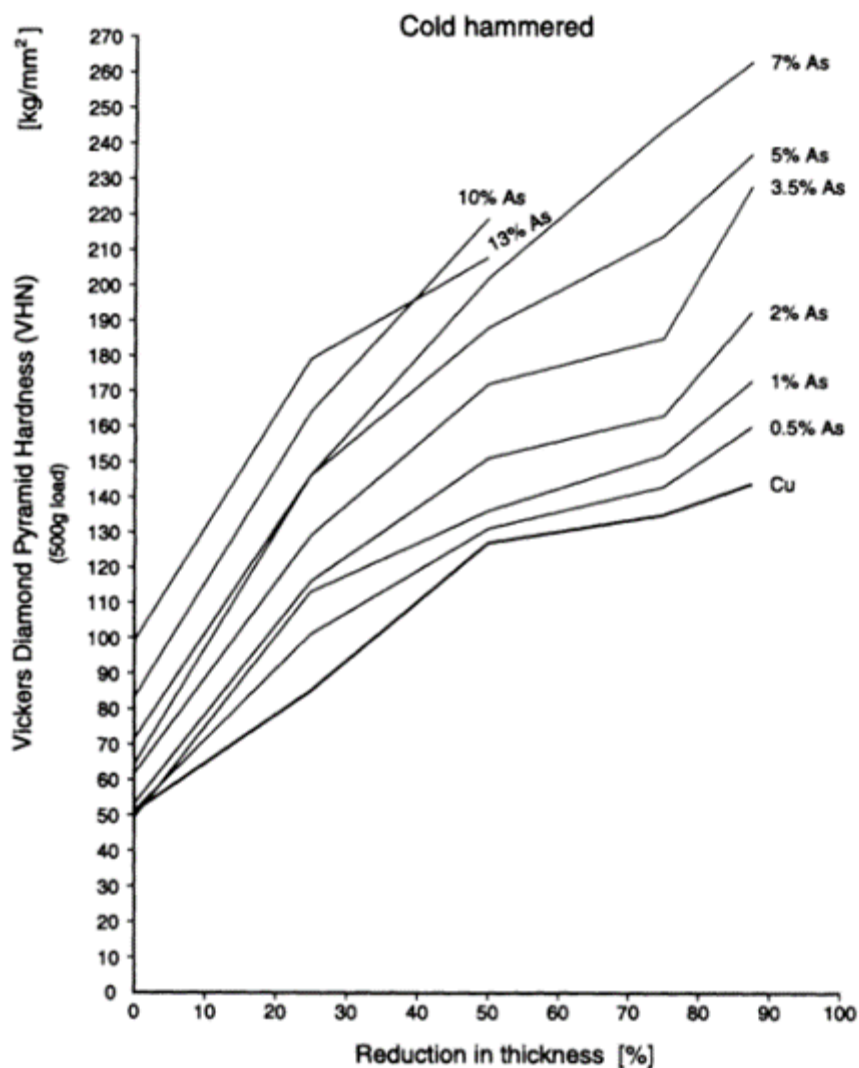
Kuva 1. Rekonstruktio kulhonmallisesta uunista [1, s. 7].

Yleisimmät kupari- ja pronssikaudella käytetyt kuparipohjaiset metalliseokset voidaan luokitella seuraavasti: puhdas kupari (sisältää alle yhden prosentin arsenikkia, nikkeliä, sinkkiä ja lyijyä, ja alle kaksi prosenttia tinaa), tinapronssi (kuparia, joka sisältää yli kaksi prosenttia tinaa), arseeninen kupari (kuparia, joka sisältää yli yhden prosentin arseenia) ja nikkelinen kupari (kuparia, joka sisältää yli yhden prosentin nikkeliä) [9].



Kuva 2. Arseenisia kupariesineitä: veitsenterä, neuloja ja naskaleita [10].

Jo ennen pronssikauden alkua hyödynnettiin puhtaan kuparin lisäksi arseenilla seostettua kuparia, jota kutsutaan myös arseenipronssiksi [3, s. 9]. Monet kuparikauden aikaiset kupariesineet sisältävät merkittäviä määriä (yli 1 %) arseenia [9], minkä voidaan päätellä johtuvan joko arseenin lisäämisestä sulaan kupariin tai arseenia sisältävien kuparimineraalien käytöllä metallin valmistuksessa [3, s. 9]. Kuvassa 2 on arseenisesta kuparista valmistettuja veitsenterä, neuloja ja naskaleita Kreikasta varhaiselta pronssikaudelta [10].



Kuva 3. Puhtaan kuparin sekä kuparin ja arseenin seosten kovuuden lisääntyminen kylmämuokkauksen seurauksena [11].

Vaikka arseenin lisääminen valettuun kupariin lisää metallin kovuutta vain marginaalisesti, arseeniatomien läsnäolo kuparihilassa mahdollistaa arseenipronssin erinomaiset muokkajittumisominaisuudet. Arseenipronssia voidaan muokata erittäin

voimakkaasti ilman että se muuttuu hauraaksi. [11] Lisäksi kuparin ja arseenin seokset muokkauslujittuvat puhdasta kuparia nopeammin [3, s. 10]. Kuvasta 3 voidaan nähdä arseenin lisäämisen vaikutus kuparin muokkauslujittumiskäyttäytymiseen.

3.2 Kupariset aseet ja työkalut

Kupariset työkalut kehittyivät niitä edeltäneiden kivisten työkalujen pohjalta. Esimerkiksi nykyisen Serbian alueelta löytyneistä kuparikautisista kuparisista työkaluista on huomattu, että ne on tehty varhaisempia kivisiä työkaluja jäljitellen. Nämä varhaiset kuparityökalut oli valmistettu tarpeettoman painaviksi ja kookkaiksi, vastaavien kivityökalujen kokoisiksi. Kiviset työkalut oli valmistettava riittävän kookkaiksi niiden murtumisriskin pienentämiseksi, eivätkä varhaiset sepät ilmeisesti vielä täysin ymmärtäneet, että kupari on huomattavasti kiveä sitkeämpää eikä siitä tehty kapeateräinen työkalu murru yhtä helposti. Ajan myötä kuparisten työkalujen paino ja koko pienenivät, kun metallin ominaisuuksia opittiin ymmärtämään paremmin. [12]

Kuparin merkittävimpiä etuja kiveen nähden on sen pehmeys ja sitkeys, minkä ansiosta siitä voidaan valmistaa muotoja, joita ei ole mahdollista valmistaa kivistä. Lisäksi sitä on ollut mahdollista sulattaa ja käyttää uudelleen, toisin kuin kivisiä työkaluja. Kuparin erittäin alhainen kovuus kiveen verrattuna kuitenkin heikensi sen käyttömahdollisuuksia tietyissä käytännön sovellutuksissa. Esimerkiksi kupariset kirveet eivät luultavasti olleet juurikaan kivikirveitä tehokkaampia. [13]

Kuparista pystyttiin valmistamaan vähemmän hauraita aseita kuin kivistä. Tästä syystä esimerkiksi kuparista valmistetut veitset ja tikarit voitiin tehdä pidemmiksi kuin niitä edeltäneet kiviset veitset ja tikarit. [14] Takomalla lujitetusta kuparista voitiin valmistaa hyödyllisiä työkaluja, kuten veitsiä maanviljelyn helpottamiseksi. Kupariveitsillä pystyttiin myös helposti leikkaamaan esimerkiksi eläinten lihaa. [7, s. 75] Kuparista voitiin myös valmistaa esimerkiksi kirveitä ja talsoja puun työstämiseen [13].

Kupariset terät soveltuivat kuitenkin huonosti eläinten nahkojen lävistämiseen ja luiden leikkaamiseen. Kupariveitset eivät myöskään olleet tehokkaita aseita alhaisen lujutensa vuoksi. [7, s. 75] Veitsien ja tikarien lisäksi kuparista on valmistettu esimerkiksi kirveenteriä ja hilpareita [15]. Kuparin ja varhaisen pronssin alhainen kovuus [16] on varmasti osaltaan hankaloittanut aseiden valmistamista kuparista. Arseenilla seostetusta kuparista on kuitenkin ollut mahdollista valmistaa hyvinkin vaativaan työhön soveltuvia

työkaluja, sillä arseenisesta kuparista valmistettuja työkaluja on käytetty esimerkiksi pyramidien rakentamisessa muinaisessa Egyptissä [17].

4. PRONSSIKAUSI

Pronssikauden alkuna pidetään ajankohtaa, jolloin muinaiset metallinvalmistajat osasivat tietoisesti sekoittaa kuparia ja tinaa oikeassa suhteessa valmistaakseen pronssia. [7, s. 75] Tinapronssin käyttö alkoi Sumerissa noin 3000 eaa. ja yleistyi vähitellen seuraavien satojen ja tuhansien vuosien aikana [4, ss. 15–18]. Tinapronssin käytön aloittamista Sumerissa pidetään yleisesti pronssikauden alkamisajankohtana.

Pronssikauden alkaessa havaittiin, että tiettyjen metallien seokset ovat ominaisuuksiltaan parempia kuin kyseiset metallit puhtaissa muodoissaan. Ymmärrys metallien seostamisesta tapahtui samoihin aikoihin kuin ymmärrys metallien erottamisesta yhdisteistä eli malmeista. [7, s. 75] Kupariin verrattuna pronssi on huomattavasti vahvempaa, joten tinan sekoittamista pronssiin voidaan pitää merkittävänä edistysaskeleena. [3, s. 18] Tinapronssi on ollut mekaanisilta ominaisuuksiltaan myös arseenipronssia huomattavasti parempaa, minkä vuoksi sepät ovat siirtyneet käyttämään sitä mahdollisuuksien salliessa [18]. Tina lisää kuparin kovuutta merkittävästi enemmän kuin arseeni, ja tinapronssia voidaan myös muokkauslujittaa enemmän kuin arseenipronssia [11].

Kupariin verrattuna tina on suhteellisen harvinaista, ja sen esiintymät ovat keskittyneet tietyille maantieteellisille alueille, mikä on vaikeuttanut tinapronssin käyttöönottoa. Harvinaisten ja hyvin paikallisten tinaesiintymien hyödyntäminen on vaatinut yhteisöjen välistä kaupankäyntiä ja tinan kuljettamista pitkiä matkoja. [3, s. 18] Tinan epävarmasta saatavuudesta kertoo se, että arseenipronssin käyttöaste vaihteli pronssikauden aikana, ilmeisesti tinan kulloisenkin saatavuustilanteen mukaan. Tinan tullessa paremmin saatavaksi tarve käyttää arseenia kuparissa väheni. [3, s. 20] Pronssikauden keskivaiheilla, 2200–1600 eaa., arseenipronssia käytettiin vielä yleisesti Euroopassa ja läntisessä Aasiassa, ja tinapronssi korvasi arseenipronssin näillä alueilla vasta myöhäisellä pronssikaudella [11]. Arseenisen kuparin käytöstä luovuttiin kokonaan tinapronssin käytön yleistyttyä [3, s. 35].

4.1 Pronssin valmistus

Tinapronssia voidaan valmistaa kahdella tavalla. Ensimmäinen tapa on sekoittaa kassiteriittiä (SnO) kupariin ja kuumentaa seos pronssin sulamispisteeseen, jolloin kassiteriitti pelkistyy tinaksi ja absorboituu kupariin. Toinen tapa on sekoittaa metallista tinaa oikeassa suhteessa sulaan kupariin. [3, s. 19] Vanhimmassa sumerilaisten käyttämässä pronssinvalmistusmenetelmässä, joka tunnetaan nimellä ”messinkimenetelmä”, sekoitettiin keskenään kiinteää kuparioksidia (CuO) ja kassiteriittiä (SnO) ja pelkistettiin ne yhdessä puuhiiltä käyttäen. Menetelmän tuloksena syntyy kuparin ja tinan seosta, tinapronssia. Pronssia voitiin myös valmistaa sekoittamalla puhdasta kuparia, tinasta valmistettua tinaoksidia ja puuhiiltä. Tällöin hiili pelkistää kuumennettaessa tinaoksidin mutta ei reagoi kuparin kanssa. Pelkistytvä tina seostui sulavan kuparin kanssa muodostaen tinapronssia. [4, ss. 15–16]

Pronssin sulamislämpötila 950 °C on mahdollista saavuttaa sylinterinmallisella, savesta tehdyllä uunilla, jossa on savinen ritilä. Uunin sivussa olisi ollut reikä, josta upokas voidaan asettaa tulen kuumimman osan ylle. Myöhemmältä ajalta on löydetty kivistä tehtyjä, neliskanttisia uuneja. [3, s. 21] Savisia suuttimia, joilla palkeet yhdistettiin uuniin, on löydetty arkeologisissa kaivauksissa paljon ja ne ovat yleisiä todisteita metallien valmistuksesta. Yksinkertaisimmillaan ne ovat kartionmuotoisia savikappaleita, joiden läpi kulkee sylinterinmuotoinen reikä. Edistyneemmissä suuttimissa reikä laajenee palkeiden suuttimen suuntaan ja kapenee uuniin menevää päätä kohti. Jotkin suuttimet ovat poikkileikkaukseltaan puolipyörän muotoisia, ilmeisesti siksi, että litteä puoli on voitu asettaa maata vasten. [3, s. 22]

Pronssikauden keskivaiheilta Lähi-Idästä peräisin oleville esineille tehdyt kemialliset analyysit osoittavat, että tuon aikaisen pronssin keskimääräinen koostumus oli noin 87 % kuparia, 10–11 % tinaa, ja pieniä määriä (alle 1 %) rautaa, nikkeliä, lyijyä, arseenia ja antimonia. [7, s. 75] Pronssiesineiden tinapitoisuus kuitenkin vaihteli suuresti [19] [20], riippuen käyttökohteesta, ajasta, paikasta ja tinan saatavuudesta. Pronssin kovuuteen vaikuttivat sekä tinapitoisuus että valmistusmenetelmä, ja jo suhteellisen varhain ihmiset hyödynsivät eri valmistustekniikoita ja eri koostumuksia metallin käyttökohteista riippuen [19]. Korkeimmillaan tinapitoisuus oli vaatimaan käyttöön tarkoitetuissa terävissä työkaluissa ja aseissa, kuten veitsissä ja tikareissa. Vähemmän vaativiin kohteisiin alhaisemman tinapitoisuuden pronssi tai arseenipronssi nähtiin riittävänä. [20]

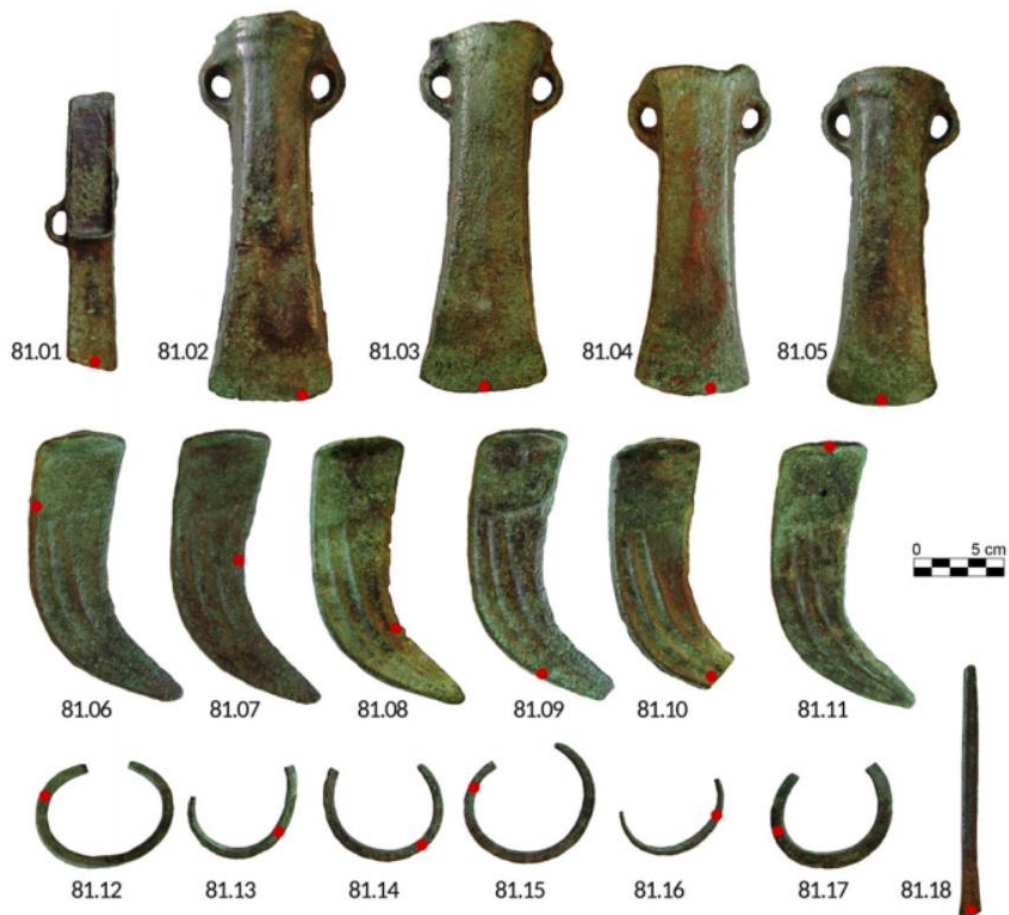
Useat pronssikautiset sepät osasivat hallita metallin koostumusta suhteellisen tarkasti, mikä voidaan päätellä epäpuhtauksien alhaisesta määrästä monissa löydetyissä pronssikautisissa pronssiesineissä [21]. Pronssikautiset sepät myös tunsivat hyvin metallin käyttäytymisen ja osasivat valita parempilaatuista metallia haastaviin valmistuskohteisiin [22].

Varhaiset pronssiesineet valmistettiin tavallisesti valamalla minkä jälkeen niitä taottiin pronssin lujittamiseksi [4, s. 18]. Valamiseen käytettävät muotit voitiin valmistaa kivistä, savesta, kuparista tai pronssista [3, s. 38]. Metalliset muotit olisivat kestäneet paremmin lämpötilan vaihteluita murtumatta ja olisivat yleensä säilyneet käytössä pidempään kuin kiviset muotit. Metalliset muotit kuitenkin vääristyvät lämmön takia ja huonosti pinnoitettuihin muotteihin on voinut hitsautua kiinni niissä sulatettavaa metallia. Varhaisesta muottien pinnoituksesta ei ole varmaa tietoa, mutta on spekuloitu, että ne on saatettu pinnoittaa savuisella liekillä, joka syntyy öljyä poltettaessa. Tämän jälkeen muotinpuolikkaat olisi kuumennettu noin 200 °C lämpötilaan. [3, s. 40]

Myöhemmällä pronssikaudella valamisen taito saavutti korkean tason. Kaksiosaisten muottien ansiosta vasaroimalla työstämisen tarve väheni. Lisäksi kyettiin valamaan yksityiskohtaisempia esineitä. [3, s. 35] Onttoja esineitä valamalla voitiin vähentää niihin tarvittavan metallin määrää. [12] Metalliseoksen ominaisuuksia pystyttiin hallitsemaan paremmin lisäämällä romupronssia kuparisulaan [1, s. 9]. Myöhemmällä pronssikaudella valettuun pronssiin lisättiin usein lyijyä metallin juoksevuuden parantamiseksi [3, s. 35]. Lyijy edistää sulan pronssin juoksevuutta ja suurentaa sen jähmettymisen lämpötila- aluetta mahdollistaen suurien ja monimutkaisten esineiden valamisen [23].

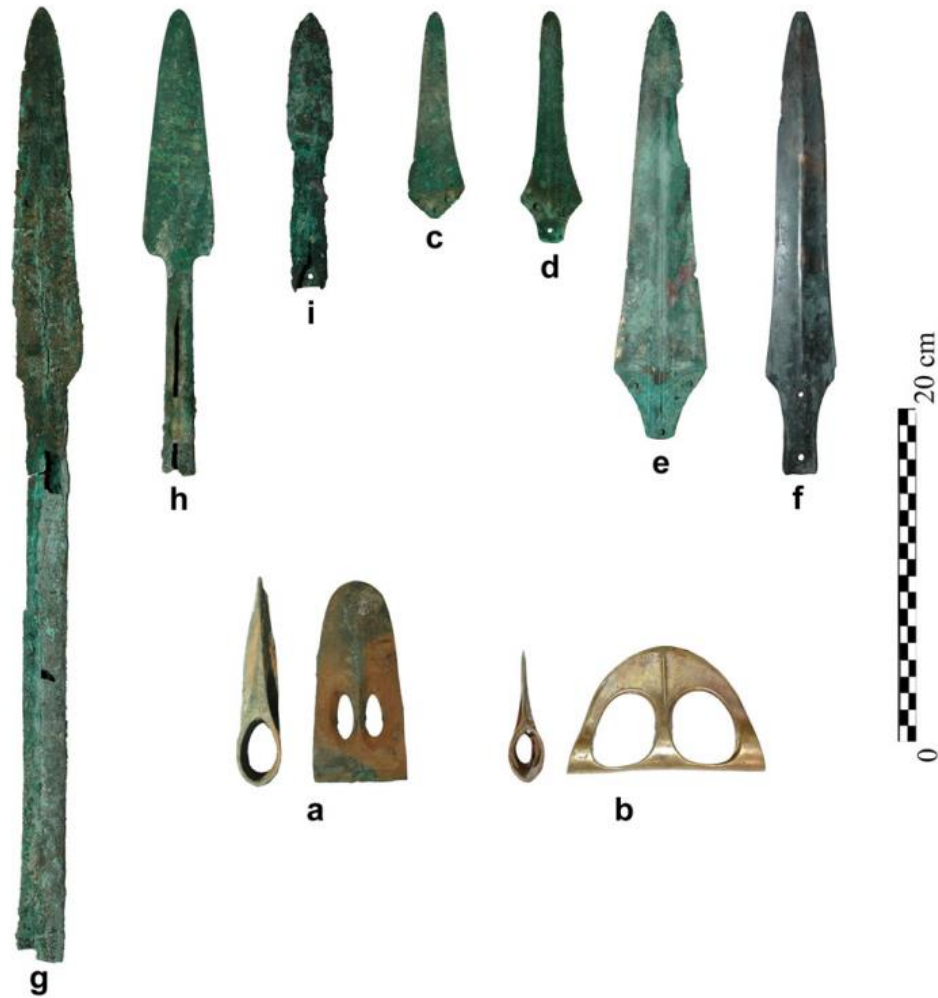
4.2 Pronssiset aseet ja työkalut

Pronssista pystyttiin valmistamaan sekä tehokkaita työkaluja että aseita [7, s. 75]. Korkeamman kovuutensa vuoksi pronssista valmistettu terä pysyy terävänä paljon kuparista paremmin, ja siksi siitä on mahdollista valmistaa teräviä aseita, kuten miekkoja, tikareita, sekä keihään- ja nuolenkärkiä [24, s. 220]. Pronssiaseista tehtyjen jäljennösten avulla on todettu, että pronssikautiset aseet olisivat olleet tehokkaita taistelussa [25]. Kuvissa 4 ja 5 on pronssikautisten työkalujen ja aseiden teriä.



Kuva 4. Pronssisia kirveenteriä, sirpinteriä, rannerenkaan muotoisia esineitä, sekä taltta [21].

Työkaluissa käytetyn pronssin koostumus vaihteli käyttökohteen mukaan. [20] Maanviljelyyn ja kotiympäristössä tehtäviin töihin ei tarvittu yhtä vahvaa metallia kuin metsästykseseen ja taisteluun [7, ss. 75–76]. Myöhemmältä pronssikaudelta löydettyjen esineiden määrä kertoo metallin valmistuksen kukoistuksesta [3, s. 35]. Pronssista valmistettiin monia erilaisia työkaluja puun, kiven ja metallin työstöön. Työkaluiksi valmistettiin esimerkiksi vasaroita, talttoja, meistejä ja naskaleita. [3, s. 41]



Kuva 5. Lähi-idän alueelta löydettyjä pronssiaseita pronssikauden keskivaiheilta; (a, b) kirveenteriä; (c, e) tikareita; (f) niiteillä kiinnitetty keihäänkärki; (g,h,i) kannallisia keihäänkärkiä [26].

Varhaisella pronssikaudella käytetyt aseet olivat melko yksinkertaisia, eikä niiden käyttämiseen vaadittu erityisen paljon taitoa tai koulutusta. Tällaisia aseita olivat esimerkiksi veitset ja tikarit, kirveet, tapparat, keihäät, sekä jouset ja nuolet. Varhaisten pronssiaseiden valmistuksessa ei täysin hyödynnetty pronssin täyttä potentiaalia materiaalina, esimerkiksi sen suhteen, miten monimutkaisia muotoja pronssista on mahdollista valmistaa. [14]

Metallinvalmistustekniikoiden kehittyminen johti kuitenkin pronssikauden edetessä entistä kehittyneimpien aseiden valmistamiseen. Tällaisia aseita olivat esimerkiksi miekat, sekä entistä taidokkaammin valmistetut keihäät. Kehittyneempien aseiden käyttämiseen tehokkaasti taistelussa vaadittiin entistä korkeampaa koordinaatiokykyä ja kehittyneempiä motorisia taitoja. Näiden aseiden tehokkaaseen käyttämiseen vaadittiin

huomattavaa määrää harjoitusta, ja itse aseiden valmistamiseen materiaalia, aikaa ja muita resursseja. Olisi siis ollut loogista, että tietyt henkilöt olisivat erikoistuneet aseiden käytön harjoittamiseen, jotta aseiden valmistukseen käytetyt resurssit eivät olisi kuluneet hukkaan kokemattomien sotureiden käsissä. Tämän vuoksi oletetaan, että kehittyneempien pronssiaseiden myötä syntyivät myös ammattisotilaat ja ammattiarmeijat. [14] Pronssisten aselöytöjen runsaus kertoo myös lisääntyneestä sodankäynnistä pronssikaudella [24, s. 220].

5. RAUTAKAUSI

Rautakauden alkamisen tarkka ajankohta on epäselvä, mutta rautakauden voidaan katsoa alkaneen noin 1500 eaa. takoraudan käytöllä [7, s. 74]. Noin vuoden 900 eaa. jälkeen raudan käyttö oli yleistä ja sitä hyödynnettiin moniin eri käyttökohteisiin, muun muassa miekkoihin, tikareihin, haarniskansuomuihin ja kahleisiin [1, s. 14].

Varhaisin ihmiskunnan käyttämä rauta on ollut peräisin meteoriiteista ja sitä käytettiin jo kauan ennen rautakauden alkua [27, s. 3]. Varhaisimmat todisteet meteoriittiraudan käytöstä ovat peräisin ajalta 6000–3000 eaa. Iranista, Irakista ja Egyptistä [28]. Meteoriittiraudasta valmistettiin yksinkertaisia koruja ja muita esineitä kylmämuokkaamalla [24, s. 295]. Ennen rautakauden alkua käytettyä meteoriittirautaa pidettiin hyvin arvokkaana. Assyrialaisten dokumenttien mukaan meteoriittirauta oli kahdeksan kertaa arvokkaampaa kuin kulta [28]. Meteoriittirauta sisältää yleensä nikkeliä, 6–26 % pitoisuuksina [27, s. 5].

Rautaa esiintyy myös maan pinnalla natiivissa muodossa. Natiivi rauta on meteoriittirautaakin harvinaisempaa ja sitä on ajoittain löydetty arvoesineistä. Natiivi rauta sisältää yleensä hyvin runsaasti nikkeliä, jopa 70 %. Toisin kuin meteoriittirauta ja natiivi rauta, malmeista saatava rauta ei tavallisesti sisällä nikkeliä. [27, s. 5] Rautaesineiden nikkeliäpitoisuuksien perusteella on voitu päätellä mistä niiden sisältämä rauta on peräisin. Koska meteoriittirauta ja natiivi rauta muodostavat vain hyvin pienen osan maapallon rautavarannoista, ihmiskunnan on täytynyt oppia hyödyntämään rautamalmeja, jotta rautaa on pystytty hyödyntämään laajalti.

Raudanvalmistus keksittiin todennäköisesti ensimmäisenä nykyisen Turkin alueella hieman ennen vuotta 2000 eaa. [24, s. 295]. Raudan valmistuksen keksimisen yksityiskohdista ei ole varmaa tietoa. Jotkut tutkijat ovat esittäneet, että rautaa olisi aluksi valmistettu vahingossa kuparin sulattamiset yhteydessä, mutta suoria todisteita tästä, kuten kuparijäämiä varhaisissa rautaesineissä, on vain vähän. Kuitenkin vaikka konkreettiset todisteet siitä, että raudan valmistus kehittyi muiden metallien valmistuksen seurauksena vahingossa, ovat puutteellisia, uskottavaa vaihtoehtoista teoriaa raudan valmistuksen keksimiselle ei ole. [29] Lisäksi teoriaa tukee esimerkiksi se, että kupari- ja rautamalmeja esiintyy yleisesti yhdessä, joten niitä olisi helposti voinut päätyä tahattomasti samoihin sulatusuuneihin [30]. Varhaisimmat todisteet raudasta, joka ei ole

natiivia tai meteoriittirautaa, on löydetty pienistä koristeupotuksista kultakoruissa tai pienissä uskonnollisissa esineissä. On esitetty, että tämä rauta olisi syntynyt kullantuotannon sivutuotteena. Rautaa sisältävää magnetiittia esiintyy yleisesti kultaa sisältävässä hiekassa Nubiassa ja siitä olisi voitu kullan sulattamisen yhteydessä pelkistää rautaa tahattomasti. [27, ss. 5–6]

Yksiselitteistä syytä siihen, miksi ihmiset siirtyivät pronssin käytöstä raudan käyttöön, ei ole löydetty, ja monet tutkijat ovat asiasta erimielisiä. Raudan käyttö ei yleistynyt välittömästi raudanvalmistustekniikoiden kehittämisen jälkeen. Raudanvalmistuksen keksimisen ja sen yleistymisen välillä Lähi-idän alueella on noin tuhannen vuoden pituinen väli, ja syyt tähän suhteellisen pitkään siirtymäkauteen ovat epäselviä. Vaikka raudanvalmistuksen leviämisen syistä ei ole kiistatonta varmuutta, on kuitenkin todennäköistä, että useat eri tekijät ovat vaikuttaneet siirtymään pronssin ja raudan välillä. [30]

Pronssista rautaan siirtymistä on yritetty selittää vertailemalla metallien mekaanisia ominaisuuksia. Varhaisessa tutkimuksessa oletuksena oli, että raudan ominaisuudet, kuten kovuus, olisivat yliveraisia pronssiin verrattuna, ja että rauta olisi tästä syystä luonnollisesti syrjäyttänyt pronssin. [30] Kuitenkaan hiilettämätön ja karkaisematon rauta ei ole merkittävästi kovempaa kuin 10 % tinaa sisältävä pronssi, varsinkaan sellainen, jota on kylmämuokattu [31, katso 30]. Jotta raudasta saataisiin merkittävästi kovempaa kuin pronssista, sitä on seostettava hiilen kanssa [30]. Muinaisten rautaesineiden pintakerrokset ovat tyypillisesti tuhoutuneet korroosion seurauksena, mikä tekee niiden tutkimisesta haastavaa. Vaikka varhaisia rautaesineitä olisi hiiletetty, useat hiilettämisestä kertovat todisteet ovat saattaneet tuhoutua korroosion vuoksi. [32]

Raudan parempi saatavuus pronssiin käytettäviin metalleihin verrattuna on saattanut olla eräs raudanvalmistuksen käyttöönottoa ja leviämistä edesauttanut tekijä. Rauta on huomattavasti yleisempää maan kuoressa kuin kupari ja siihen yleisimmin seostettavat metallit, kuten tina. (30) Rautamalmien yleisyyden vuoksi rautaisia aseita ja työkaluja voitiin valmistaa paljon halvemmalla kuin vastaavia pronssiesineitä [1, s. 18].

Kuparin ja pronssin valmistamisesta saadut metallurgiset taidot ja kokemus olisivat luultavasti osaltaan edesauttaneet raudan valmistamisen käyttöönottoa ja leviämistä. Erään näkökulman mukaan varhaiset raudanvalmistusteknologiat olisivat kukoistaneet alueilla, joilla oli pitkäaikaista kokemusta kuparin valmistuksesta. [29] Vaihtoehtoisen näkökannan mukaan ajan saatossa vakiintuneet pronssinvalmistusperinteet olisivat

voineet hidastaa raudanvalmistustekniikoiden käyttöönottoa, sillä uudet metallinvalmistustekniikat olisi nähty poikkeamana vakiintuneisiin käytäntöihin ja niiden käyttöönottoa olisi tästä syystä mahdollisesti vastustettu [33, katso 29].

5.1 Raudan valmistus

Raudan käytön suurimpia haasteita on sen korkea sulamispiste kupariin verrattuna. Puhtaan raudan sulamispiste on $1\,540\text{ °C}$, eikä ihmisen ole ollut mahdollista saavuttaa tätä lämpötilaa keinotekoisesti ennen 1800-lukua. [3, s. 48] Tämän vuoksi raudan valmistuksessa ei voitu hyödyntää pronssikaudella vakiintuneita pelkistys- ja sulatusmenetelmiä [28]. Rauta piti alun perin tuottaa pelkistämällä rautamalmista noin $1\,200\text{ °C}$ lämpötilassa puuhiiltä hyödyntäen. [3, s. 48] Rautaa pelkistettiin asettamalla uniin kerroksittain rautamalmia ja puuhiiltä ja kuumentamalla sitä useita tunteja [24, s. 296]. Pelkistämiseen vaadittava lämpötila ei ole merkittävästi kuparin sulamispistettä korkeampi, joten samoja uuneja, joita on käytetty kuparin pelkistämiseen malakiitista, on voitu hyödyntää myös raudan pelkistämiseen hematitista [4, ss. 28–29].



Kuva 6. Rautamalmin pelkistysprosessin tuloksena syntynyt bluumi (34)

Ensimmäinen ihmisen valmistaman raudan muoto oli niin kutsuttu ”bluumirauta” (engl. ”bloomery iron”) [32]. Kuvassa 6 näkyy rautamalmin pelkistysprosessin tuotteena syntyvä kappale, jota kutsutaan ”bluumiksi” (engl. ”bloom”). Rautabluumi on heterogeeninen massa, joka koostuu kiinteästä raudasta, kuonasta ja palamattomista puuhiilen kappaleista. Bluumiproessin (engl. ”bloomery process”) tuotteena syntyvä rauta on usein koostumukseltaan hyvin epätasaista ja sisältää hiilipitoisuudeltaan vaihtelevia alueita sekä vaihtelevia pitoisuuksia eri alkuaineita kuten arseenia ja fosforia. [3, s. 48] Rautabluumia oli kuumennettava ja taottava toistuvasti, jotta siitä saatiin käyttökelpoista rautaa [24, s. 296]. Tämä tehtiin bluumissa olevien huokosten sulkemiseksi ja kuonan poistamiseksi [32].

Bluumiprosessissa syntyvän, matalan hiilipitoisuuden omaavan raudan kovuus ja korroosionkesto-ominaisuudet ovat kuparia alhaisempia, mutta sen kovuutta voidaan nostaa merkittävästi hiilettämällä sitä teräkseksi [1, s. 14]. Kun puuhiiltä poltetaan ilmassa, vapautuu sekoitus hiilimonoksidia ja hiilidioksidia. Kun hiilimonoksidi joutuu kosketuksiin raudan kanssa, hiiliatomit pystyvät liukenemaan rautaan. [35] Merkkejä raudan hiilettämistä varhaisella rautakaudella on löydetty vaihtelevissa määrin. Aikaisemmissa löydöksissä saattaa olla merkkejä hiiletystä, mutta samalta alueelta myöhemmin löydettyissä esineissä ei. Raudan hiilettäminen on saattanut olla tahatonta ja on voinut tapahtua esimerkiksi seurauksena puuhiilen läsnäolosta pelkistysprosessissa. [30] Kokeellisesti on osoitettu, että kuumennettaessa takorautaa 900–1 050 °C lämpötilassa puuhiilellä lämmitetyssä uunissa tapahtuu merkittävää hiilettymistä [35].

Rauta-hiili seoksia voidaan karkaista jäädyttämällä kuumennettu metalli nopeasti veteen upottamalla, mikä lisää teräksen kovuutta. Karkaistu korkeahiilinen teräs on kuitenkin haurasta eikä siitä valmistettu ase tai työkalu ole kovin hyödyllinen, ellei metallille suoriteta päästökäsittelyä karkaisun jälkeen. Päästökäsittelyssä karkaistua terästä pidetään suhteellisen matalassa lämpötilassa, mikä alentaa hieman teräksen kovuutta mutta tekee siitä sitkeämpää ja vähemmän haurasta. [3, s. 52] Varhaisella rautakaudella päästöä ei kuitenkaan hallittu tai ymmärretty tarpeeksi hyvin, jotta sitä olisi voitu hyödyntää laajalti [4, s. 34]. Tämän vuoksi myöskään karkaisua ei juuri hyödynnetty varhaisella rautakaudella.

Karkaistuista teräsesineistä on kuitenkin löydetty yksittäisiä todisteita, joten jotkut sepät ovat ilmeisesti osanneet hyödyntää teräksen karkaisua ja päästöä oikeaoppisesti. [3, s. 52] Kokeellisesti on osoitettu, että vähäinenkin hiiletyskerros, syvydeltään 0,015–0,02

mm, mahdollistaa sellaisten työkalujen ja aseiden terien valmistamisen, jotka olisivat olleet merkittävästi kylmämuokattua pronssia kovempia [23]. Lisäksi on osoitettu, että raudan hiilettäminen puuhiiliuunissa on suhteellisen helppoa [35], joten on mahdollista, että useat sepät olisivat oppineet hiilettämään rautaa varhaisella rautakaudella. Rautaesineet ovat hyvin alttiita korroosiolle, joten on mahdollista, että useimpien rautakauden alkuvaiheessa valmistettujen rautaisten terien ohuet hiiletyskerrokset olisivat tuhoutuneet korroosion seurauksena ja näin todisteet varhaisesta hiiletuksesta ja karkaisusta olisivat jääneet hyvin vähäisiksi. [32]

5.2 Rautaiset aseet ja työkalut

Ennen raudanvalmistustekniikoiden leviämistä rauta oli harvinaista ja sitä käytettiin aluksi vain pieniin koriste-esineisiin tai tikarinteriin [3, s. 47]. Metallurgian kehityksen varhaisimmissa vaiheissa karkenevat rautaesineet olivat niin harvinaisia, että niitä annettiin hallitsijoille lahjoina [4, s. 30]. Esimerkiksi 1300-luvulla eaa. kuolleen egyptiläisen faarao Tutankhamonin haudasta on löydetty meteoriittiraudasta valmistettu tikari [27, s. 5].

Käytetyn raudan laatu vaikutti aseiden ja työkalujen muotoon. Esimerkiksi roomalaisten legioonalaisten käyttämät miekat olivat muodoltaan lyhyitä ja leveitä, koska tämä muoto ehkäisi metallin haurauden negatiivisia vaikutuksia [4, s. 51]. Monet varhaiset rautaesineet olivat itse asiassa raudan ja hiilen seosta, mutta on vain heikosti todisteita siitä, että raudan hiiletys olisi ollut hallittua ja tarkoituksellista [30].

Rautaiset aseet ja työkalut eivät olleet ominaisuuksiltaan pronssisia merkittävästi parempia ennen kuin hiilipitoisen raudan karkaiseminen hallittiin kunnolla [1, s. 18] [36]. Rautakauden alkuvaiheessakin käytettiin edelleen pronssia raudan rinnalla. Raudan prosessointi oli vaikeaa ja pronssi oli tarpeeksi vahvaa, jotta sen käyttämistä kannatti jatkaa [36]. Kuumentamalla käsitelty takorauta oli kovuudeltaan samankaltaista pronssiin verrattuna. Lopullisesti rautaiset työkalut ja aseet syrjäyttivät pronssiset vasta kun raudan hiiletys, karkaisu ja päästö opittiin hallitsemaan ja kun nämä menetelmät yleistyivät niiden hyötyjen käydessä ilmeisiksi. [16] Karkaisun tuoman kovuuden ansiosta raudasta oli mahdollista valmistaa huomattavasti tehokkaampia työkaluja kuin pronssista [32]. Rautaiset aseet yleistyivät ensin ja rautaiset työkalut vasta myöhemmin [37, s. 7].

Vaikka rauta ei välittömästi muuttanut sen käytön omaksuneita yhteiskuntia, pitkien aikojen saatossa sen rooli maanviljelyssä ja sodankäynnissä kasvoi merkittäväksi [30]. Raudan ja myöhemmin teräksen merkitys yhteiskunnille on säilynyt erittäin keskeisenä vuosisatojen ajan, rautakaudelta nykypäivään asti. Nykyään raudan seokset ovat hyvin merkittäviä materiaaleja käytännössä jokaisella teollisuudenalalla. [28]

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kautta ihmiskunnan historian aseisiin ja työkaluihin on käytetty niitä materiaaleja, jotka ovat olleet kovuudeltaan, sitkeydeltään ja muokattavuudeltaan näihin esineisiin soveltuvia ja joita on ollut tarpeeksi edullisesti ja helposti saatavilla, jotta niiden valmistaminen laajassa mittakaavassa on ollut mahdollista. Yleisesti voidaan sanoa, että ihmiskunta on siirtynyt hyödyntämään aseissaan ja työkaluissaan niitä materiaaleja, jotka täyttävät nämä kriteerit parhaiten. Ennen metallien käytön keksimistä kivi, luu ja puu ovat vastanneet näihin tarpeisiin parhaiten.

Kupari oli ensimmäinen metalli, jota ihmiset ovat hyödyntäneet työkalujen ja aseiden valmistukseen. Kun ihmiskunta alun perin alkoi siirtyä kivisistä työkaluista metallisiin, kupari on soveltunut työkalujen laajamittaiseen valmistamiseen parhaiten. Kuparin varhaisen käyttöönoton mahdollistivat sen yleinen esiintyminen natiivissa muodossa, sen helppo muokattavuus ja sen verrattain alhainen sulamispiste. Ensimmäiset metallurgiset menetelmät syntyivät ja kehittyivät kuparikauden aikana.

Natiivi rauta ja meteoriittirauta ovat myös olleet ihmiskunnan ulottuvilla metallien käytön varhaisista vaiheista saakka, mutta hyödynnettävissä olevan raudan lähteet ovat olleet hyvin harvinaisia, eivätkä ole pystyneet vastaamaan ihmiskunnan metallintarpeeseen. Natiivi kupari on ollut paljon yleisempää ja myös helpommin työstettävää kuin natiivi rauta tai meteoriittirauta. Kuparin mekaaniset ominaisuudet eivät tee siitä erityisen hyvää materiaalia työkalujen ja aseiden valmistukseen moniin muihin metalleihin verrattuna, mutta saatavuuden ja valmistuksen helppouden suhteen se on ollut yliverlainen.

Ajan myötä ihmiset oppivat pelkistämään metallia malmeista puhtaiden metalliesiintymien hyödyntämisen lisäksi ja tietoisesti seostamaan metalleja toisiinsa tiettyjen haluttujen ominaisuuksien aikaansaamiseksi. Kupariin lisättiin yleisesti arseenia, mikä edesauttoi sen muokkauslujittumista. Kuparin ja arseenin seosta kutsutaan arseenipronssiksi.

Metallien pelkistäminen malmeista ja metallien seostaminen mahdollistivat seuraavan merkittävän siirtymän työkalu- ja asemetallien kehityksessä: tinapronssin valmistamisen. Tinapronssin mekaaniset ominaisuudet olivat yliverlaiset puhtaaseen kupariin verrattuna ja myös huomattavasti paremmat kuin arseenipronssilla. Tinapronssin valmistuksen

keksimisen jälkeen ihmiskunta alkoi siirtyä kuparikaudesta pronssikaudelle. Tinapronssin suotuisat ominaisuudet antoivat ihmiskunnalle syyn siirtyä käyttämään siitä tehtyjä työkaluja ja aseita, mutta kuparin ja arseenipronssin lopullista syrjäyttämistä hidasti tinan epävarma saatavuus.

Ensimmäinen ihmisten käyttämä rautamalmista peräisin oleva raudan muoto oli pelkistämällä valmistettua takorautaa. Rautakauden alkuvaiheessa on nähtävissä mielenkiintoinen tilanne, jossa uusi materiaali, rauta, on vähitellen levinnyt ihmisten käyttöön, vaikka sen mekaaniset ominaisuudet eivät olleet tinapronssia paremmat työkalujen ja aseiden valmistuksessa. Toisin kuin kuparista pronssiin siirryttäessä, raudan käyttöönottoa eivät edesauttaneet materiaalin ylivertaiset ominaisuudet, vaan sen leviämistä on todennäköisesti edesauttanut sen huomattavasti helpompi saatavuus pronssiin tarvittavaan tinaan verrattuna. On myös mahdollista, että hiilletettyjä rautaesineitä, joilla olisi kovuutensa ansiosta ollut etulyöntiasema pronssiin nähden, on ollut käytössä luultua enemmän ja aikaisemmin, koska todisteet näistä esineistä olisivat tuhoutuneet lähes kokonaan korroosion seurauksena.

Rauta syrjäytti pronssin lopullisesti vasta kun sen hiilettäminen, karkaisu ja päästö opittiin hallitsemaan laajasti. Raudan merkitys on säilynyt ihmiskunnan kannalta keskeisenä vuosisatojen ajan, nykypäivään asti, sillä raudan seoksia hyödynnetään erittäin laajasti monissa käyttökohteissa.

Siirtymiin pääasiallisten työkalu- ja asemetallien välillä ovat vaikuttaneet pääasiassa uusien materiaalien mekaaniset ominaisuudet sekä niiden valmistukseen tarvittavien raaka-aineiden saatavuus. Metallien väliset siirtymät eivät ole olleet nopeita ja äkkinäisiä, vaan ne ovat tapahtuneet vähitellen pitkien aikojen kuluessa, ja niihin ovat vaikuttaneet myös monet sosiaaliset ja taloudelliset tekijät. Tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi uusien metallinvalmistustekniikoiden kulkeutuminen paikasta toiseen ihmisten mukana, yhteisöjen sitoutuminen tiettyjen metallien tuotantoon, sekä tiettyjen kriittisten raaka-aineiden saatavuuden ja hintojen vaihtelut. Monina aikoina uusia metalleja tai metalliseoksia on käytetty rinnakkain niitä edeltäneiden materiaalien kanssa esimerkiksi tiettyjen raaka-aineiden vaikean saatavuuden vuoksi, tai siksi, että uusien materiaalien mekaaniset ominaisuudet eivät ole olleet riittävän hyviä syrjäyttämään vanhoja materiaaleja. Tämä on nähtävissä arseenipronssin käytön ajoittaisessa lisääntymisessä pronssikauden aikana sekä erityisesti tinapronssin ja raudan rinnakkaisessa käytössä rautakauden alkuvaiheessa.

Kun ihmiskunta on omaksunut uusien metallien käytön, se on myös johtanut tehokkaampien aseiden ja työkalujen valmistamiseen. On hyvin loogista, että uusien materiaalien paremmat mekaaniset ominaisuudet mahdollistavat parempien työkalujen ja aseiden valmistamisen, mikä puolestaan toimii tehokkaana kannustimena uusien metallien käyttöönotolle, sillä tehokkaammilla aseilla ja työkaluilla on hyvin konkreettisia vaikutuksia niitä käyttäneiden ihmisten elämään. Toisaalta myös muut uusiin metalleihin liittyvät tekijät kuin mekaaniset ominaisuudet ovat voineet vaikuttaa aseiden ja työkalujen valmistukseen ja hyödyttäneet merkittävästi niihin yhteisöjä, jotka ovat siirtyneet käyttämään niitä. Vaikka rauta ei ollut pronssia mekaanisesti parempaa, rautamalmin yleisyys olisi huomattavasti helpottanut esimerkiksi tehokkuudeltaan pronssiin vertautuvien työkalujen laajamittaista valmistusta ja siten vaikuttanut merkittävästi sen käytön omaksuneisiin yhteiskuntiin.

Uusien metallien käyttöönottamiseksi ihmiskunnan on pitänyt kehittää uusia metallurgisia tekniikoita. Kuparin hyödyntäminen on tullut helpommaksi, kun ihmiset ovat ymmärtäneet, että sitä on mahdollista sulattaa ja valaa. Arseeni- ja tinapronssin kehittämiseksi ihmiskunnan on pitänyt ymmärtää metallien pelkistäminen malmeista, sekä metallien seostaminen toisten alkuaineiden kanssa. Rautamalmin hyödyntämiseksi ihmisten on pitänyt kehittää bluumitekniikka, jolla rauta saadaan eroteltua malmista raudan sulamispistettä alhaisemmissa lämpötiloissa. Valmistustekniikoiden kehittyminen on vaikuttanut paitsi siihen, mitä materiaaleja ihmiset ovat pystyneet hyödyntämään, myös siihen millaisia esineitä niistä on mahdollista valmistaa. Esimerkiksi valamisen kehittyminen mahdollisti hyvin monimutkaisten ja yksityiskohtaisten muotojen valmistamisen, joita ei ollut mahdollista saavuttaa takomalla. Uusien materiaalien ja valmistustekniikoiden vaikutus voidaan nähdä aseiden ja työkalujen monimuotoistumisena vuosituhansien kuluessa.

Ihmiskunta on jo melko varhain oppinut hallitsemaan erilaisia suhteellisen monimutkaisia metallurgisia menetelmiä. Luodessaan uusia metallinvalmistustekniikoita ihmiskunta on hyödyntänyt kumulatiivista tietoa, joka on karttunut tuhansien vuosien saatossa. Ihmiskunta hyödyntää edelleen samoja metalleja ja samaa metallurgista tietämystä kuin muinaiset metallisepät, vaikkakin monien metallien pääasialliset käyttökohteet ovat nykyaikana erilaisia kuin ne olivat vuosituhansia sitten. Monet metallurgiset tekniikat, joita hyödynnetään edelleen, pohjautuvat menetelmiin, joita on käytetty tuhansien vuosien ajan.

LÄHTEET

- [1] A. Williams, *Sword and the Crucible; A History of the Metallurgy of European Swords up to the 16th Century*, Brill, 2012.
- [2] N.V. Rhyndina, L.K. Yakhontova, The earliest copper artefact from Mesopotamia, *Soviet Arch*, No. 2, 1985, pp. 155–165.
- [3] R.F. Tylecote, *A history of metallurgy*, second edition, CRC Press, 2002.
- [4] P. Kettunen, *Metallien historia*, Materiaaliopin laitos, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 2000.
- [5] B.W. Roberts, C.P. Thornton, V.C. Pigott, Development of metallurgy in Eurasia, *Antiquity*, Vol. 83, Iss. 322, 2019, pp. 1012–1022.
- [6] B. Roberts, Creating traditions and shaping technologies: understanding the earliest metal objects and metal production in Western Europe, *World Archaeology*, Vol. 40, Iss. 3, 2008, pp. 354–372.
- [7] A.C. Reardon, *Metallurgy for the Non-Metallurgist*, second edition, Materials Park, 2011.
- [8] N. Amzallag, From Metallurgy to Bronze Age Civilizations: The Synthetic Theory, *American Journal of Archaeology*, Vol. 113, No. 4, 2009, pp. 497–519.
- [9] L.R. Weeks, *Early Metallurgy in the Persian Gulf: Technology, Trade and the Bronze Age World*, Brill, 2003.
- [10] N. Nerantzis, Y. Bassiakos, S. Papadopoulos, Copper metallurgy of the Early Bronze Age in Thassos, north Aegean, *Journal of Archaeological Science: Reports*, Vol. 7, 2016, pp. 574–580.
- [11] H. Lechtman, Arsenic Bronze: Dirty Copper or Chosen Alloy? A View from the Americas, *Journal of Field Archaeology*, Vol. 23, No. 4, 1996, pp. 477–514.
- [12] D. Antonović, Prehistoric Copper Tools from the Territory of Serbia, *Journal of Mining and Metallurgy*, Vol. 45, Iss. 2, 2009, pp. 165–174.
- [13] S. Milisauskas, J. Kruk, Middle Neolithic/Early Copper Age, Continuity, Diversity, and Greater Complexity, 5500/5000–3500 BC, In: S. Milisauskas (Editor), *European Prehistory*, Springer, 2011, pp. 223–291.
- [14] B.P.C. Molloy, Hunting Warriors: The Transformation of Weapons, Combat Practices and Society during the Bronze Age in Ireland, *European Journal of Archaeology*, Vol. 20, 2017, pp. 280–316.
- [15] S. Milisauskas, J. Kruk, Late Neolithic/Late Copper Age 3500–2200 BC, In: S. Milisauskas (Editor), *European Prehistory*, Springer, 2011, pp. 293–325.
- [16] J. Wadsworth, Archeometallurgy related to swords, *Materials Characterization*, Vol. 99, 2015, pp. 1–7.

- [17] M. Odler, J. Kmošek, M. Fikrle, Y.V. Erban Kochergina, Arsenical copper tools of Old Kingdom Giza craftsmen: First data, *Journal of Archaeological Science: Reports*, Vol. 36, 2021.
- [18] J. Park, A. Beisenov, D. Voyakin, The technological and social implication of the discriminated use of tin and arsenic noted in EIA copper-based objects of Central Kazakhstan, *Archaeological and Anthropological Sciences*, Vol. 12, No. 81, 2020.
- [19] N. Nerantzis, Shaping bronze by heat and hammer: An experimental reproduction of Minoan Copper alloy forming techniques, *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, Vol. 12, No. 2, 2012, pp. 237–247.
- [20] S. Ferrence, A. Giunlia-Mair, Bronze Age Metal Objects from East Crete, Greece, *ISIJ International*, Vol. 54, No. 5, 2014, pp. 1139–1146.
- [21] C. Bottaini, R. Vilaça, N. Schiavon, J. Mirão, A. Candeias, R. Bordalo, G. Pateroster, I. Montero-Ruiz, New insights on Late Bronze Age Cu-metallurgy from Coles de Samuel hoard (Central Portugal): A combined multi-analytical approach, *Journal of Archaeological Science: Reports*, Vol 7, 2016, pp. 344–357.
- [22] Z. El Morr, F. Cattin, D. Bourgarit, Y. Lefrais, P. Degryse, Copper quality and provenance in Middle Bronze Age I Byblos and Tell Arqa (Lebanon), *Journal of Archaeological Science*, Vol. 40, Iss. 12, 2013, pp. 4291–4305.
- [23] P. Valério, R.J.C. Silva, A.M. Monge Soares, M.F. Araújo, F.M. Braz Fernandes, A.C. Silva, L. Berrocal-rangel, Technological continuity in Early Iron Age bronze metallurgy at the South-Western Iberian Peninsula – a sight from Castro dos Ratinhos, Vol. 37, Iss. 8, 2010, pp. 1811–1819.
- [24] D.T. Price, *Europe Before Rome: A Site-By-Site Tour of the Stone, Bronze, and Iron Ages*, Oxford University Press, 2013.
- [25] M. Downing, L. Fibiger, An experimental investigation of sharp force skeletal trauma with replica Bronze Age weapons, *Journal of Archaeological Science*, Vol. 11, 2017, pp. 546–554.
- [26] Z. El Morr, M. Pernot, Middle Bronze Age metallurgy in the Levant: evidence from the weapons of Babylos, *Journal of Archaeological Science*, Vol. 38, Iss. 10, 2011, pp. 2613–2624.
- [27] M. Durand-Charre, *Damascus and Pattern-Welded Steels: Forging Blades since the Iron Age*, EDP Sciences, 2020.
- [28] G.G. Gnesin, Iron Age: Origin and Evolution of Ferrous Metallurgy, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 55, Nos. 1–2, 2016, pp. 114–123.
- [29] N.L. Erb-Satullo, B.J.J. Gilmour, N. Khakhutaishvili, Late Bronze and Early Iron Age copper smelting technologies in the South Caucasus: the view from ancient Colchis c. 1500–600 BC, *Journal of Archaeological Science*, Vol. 49, 2014, pp. 147–159.
- [30] N.L. Erb-Satullo, The Innovation and Adoption of Iron in the Ancient Near East, *Journal of Archaeological Research*, Vol. 27, 2019, pp. 557–607.

- [31] C.S. Smith, The interpretation of microstructures of metallic artifacts, In Application of Science in the Examination of Works of Art: Proceedings of the Seminar: September 7–16, 1965, Museum of Fine Arts, Boston, pp. 20–52.
- [32] J.D. Verhoeven, A.H. Pendray, W.E. Dauksch, Did the first iron blacksmiths learn to carburize iron? part II: Experiments showing that it is very likely that they did, JOM, Vol. 68, Iss. 8, 2016, pp. 2256–2260.
- [33] O. Japaridze, From the middle bronze age to the early iron age in Georgia, In: O.Z. Soltes (Editor), National Treasures of Georgia, Philip Wilson Ltd., 1999, pp. 62–65.
- [34] Hurstwic, Comparison of the Composition of Bloomery Iron from the Viking Age and from the Modern Era, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 11.10.2021): http://www.hurstwic.org/history/articles/manufacturing/text/iron_bloom_compare.htm
- [35] J.D. Verhoeven, A.H. Pendray, W.E. Dauksch, Did the First Iron Blacksmiths Learn to Carburize Iron? Part I: Can Iron be Carburized in a Charcoal-Fired Furnace?, JOM, Vol. 68, Iss. 8, 2016, pp. 2250–2255.
- [36] Y. Tanaka, Property of Bronze Knives: An Experimental Replication of a Bronze Knife, ISIJ International, Vol. 54, No. 5, 2014, pp. 1167–1171.
- [37] M. Sage, Warfare in Ancient Greece: A Sourcebook, Taylor & Francis Group, 1996.
- [38] R.E. Oakeshott, The Archaeology of Weapons – Arms and Armour from Prehistory to the Age of Chivalry, Dover Publications, 1996.