

A vasbuca kialakulásának metallurgiai folyamatai – modellkísérletek oldalszeles kovácstűzhelyben

Metallurgical aspects of the iron bloom formation – experiments in side-blast forge

THIELE ÁDÁM¹, HÁRI LÁSZLÓ²

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,
Anyagtudomány és Technológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

²Miskolci Egyetem, Metallurgiai Intézet, Vas- és Acélméltallurgiai Intézeti Tanszék, Miskolc.



A tanulmányban egy olyan modellkísérletet mutatunk be, amelynek során oldalszeles kovácstűzbe 65-ös szegeket adagolva vasbucát hozunk létre. A kísérletek során tett megfigyelések és vételezett minták anyagvizsgálatai alapján a középkori bucvaskohászatra is érvényes megállapításokat teszünk a vasbuca kialakulásának metallurgiai viszonyaival kapcsolatban.

In this paper, a model experiment is presented, in which iron bloom is extracted from small iron nails charged into a side-blast charcoal fueled forge (copy of medieval forges). On the basis of the observations and material analyses of samples taken during the experiments, conclusions are drawn regarding the metallurgical aspects of the iron bloom formation during the medieval iron smelting.

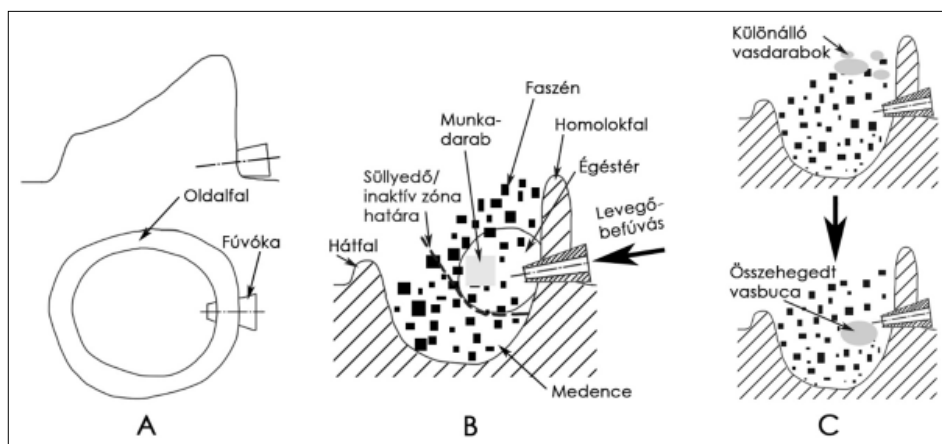


1. Bevezetés

1.1. Az oldalszeles kovácstűzhely felépítése és működése

A kovácsok évezredek óta használnak oldalszeles kovácstűzhelyeket [1], az angol nyelvű szakirodalomban „side-blast forge” (a másik, modernebb változat az alsószeles kovácstűz, „under-blast forge”) megnevezve.

A korai oldalszeles kovácstűzhelyek tulajdonképpen egyszerű, földbe vájt gödrök voltak (ld. 1A. és 1B. ábra). A gödörben faszén izzott. A gödör pereméhez radiális irányban egy fűvókát helyeztek el, ezen keresztül juttatták be a tűz szításához szükséges levegőt. Azért, hogy az izzó faszén kupacot egyben tartsák, a gödör peremére alacsony hát-, oldal- és homlokfalazatot építettek (a falazat a fűvókához közeledve egyre magasabb volt a célszerűen fűvóka fölé halmozott



1. ábra. Oldalszeles kovácstűzhely. A) oldal- és felülnézete. B) Keresztmetszete és főbb részei. C) Nagyméretű vasbuca kialakulása kisebb vasdarabokból

faszén kupac magasságának megfelelően). A kovácstűzhely fűvósík alatti része a medence.

A fűvóka előtt egy nagyjából gömb alakú térrész volt az égéstér, itt történt a faszén égése, itt alakult ki a munkadarab hevítéséhez szükséges, kellően nagy hőmérséklet. Az égéstértől távolabb már nem áll rendelkezésre elegendő oxigén a faszén elégéséhez. Az égéstér alatt és körül inaktív, álló faszén kupac található, ez az égésteret határoló inaktív zóna nem végez mozgást a kovácstűzhely üzemében. Az égéstér fölötti faszén viszont állandó mozgásban van, folyamatosan süllyed az égéstérben eléggő faszén helyére, így azt pótolni szükséges. A hevítendő munkadarabot az égéstérben helyezük el, a fűvóka orrától pár cm-es távolságban. A fűvóka és a munkadarab közötti hézagba, felülről folyamatosan pótolni kell az eléggő faszénet, amelynek fűtőértéke biztosítja a munkadarab felhevülését. Az oldalszeles kovácstűzhelyre jellemző, hogy a munkadarab a hevítés során lefelé süllyed. Ez a süllyedés mindaddig folytatódik, míg a munkadarab az égéstér aljára nem ér, és ott fel nem ül az inaktív zóna faszén kupacán. A korai oldalszeles kovácstűzhelyek nagy előnye a salakos bucavasak hevítésekor az volt, hogy a munkadarabból kifolyó salak lefolyt a medencébe, így nem tömítette el a fűvókát. A fűvóka alatt összegyűlt salakot, természetesen időnként ki kellett takarítani a medencéből.

1.2. A vasbuca kialakulása a kovácstűzhelyben

Az oldalszeles kovácstűzhelyeket elsősorban a munkadarab felhevítésére használhatták, de a kovácsoláskor vagy egyéb módon keletkező kisebb méretű vasdarab összehegesztése egy nagyobb, ismét megmunkálható vastömbbé, azaz újra hasznosítása bennük is lehetséges volt (valamekkora veszteséggel).

Kovácstűzhelyeket gyakran találtak középkori kohótelepek, vaskohászati műhelyek régészeti feltárasakor is, ezekre mint újraizzító tűzhelyekre hivatkozik a szakirodalom [2]. Az újraizzító tűzhelyekben a buca kemencéből a kohósítások végén kivett vasbucákat hevítették újra azért, hogy tovább tömörítésükkel minél inkább csökkentsék a salaktartalmukat. A kovácsfalvak kovácműhelyeikben is bizonyára ilyen felépítésű kovácstűzhelyek működtek.

Az oldalszeles kovácstűzhelyekben egyszerű gödörtűzhelyekben azonban nemcsak a munkadarab felhevítése történhetett, hanem számos más metallurgiai eljárásnak is alapvető berendezése lehetett (pl. cementálás, téglyacél-készítés – „crucible steel”, bronzolvasztás stb.). Az elmúlt években végzett kutatásaink alapján feltételezzük, hogy a késő avar korban nemcsak egyetlen kohósítás eredményeképpen, hanem ilyen oldalszeles kovácstűzhelyekben állítottak elő nagyobb méretű, kb. 10 kg tömegű ékelt vasbucákat [3]. A technológia kísérleti régészeti módszerekkel törté-

nő rekonstrukciója során kisebb méretű, 1-2 kg-os, tömörített vasbucákat raktunk az izzó faszénnel teli oldalszeles kovácstűzhelybe, a faszén kupac tetejére (ld. *1C. ábra*), amelyek lefelé süllyedve felmelegedtek, és a fűvóka alatt-előtt egyetlen nagyobb vasbucává hegedtek össze feltételezhetően diffúziós hegedéssel. Ezt a nagyobb vasbucát aztán tovább tömörítve és ék alakban bevágva a késő avar korra jellemző nagyméretű, ékelt vasbucát is sikerült készíteni (erről videó a Youtube-on: <https://youtu.be/0GpHU572pro>). Ugyanez az eljárás kisebb vasdarabokkal elvégezve alapvető újrahasznosítási technológia lehetett a múltban.

1.3. Célkitűzés

Ebben a tanulmányban egy olyan kísérletsorozat eredményeit szeretnénk bemutatni, amelyben kisméretű vasdarabokat, néhány gramm tömegű szegeket hegesztettünk össze egy nagyobb méretű vasbucává oldalszeles kovácstűzhelyben (a továbbiakban röviden a „szeghegesztős kísérlet” elnevezést használjuk). Ez egy olyan modellkísérlet, amelynek segítségével jobban megérthető, milyen metallurgiai folyamatok zajlanak le az oldalszeles kovácstűzhely fűvósíkján közelében, az így tehető megállapítások pedig kiterjeszthetők a korszakra jellemző kisméretű buca kemencékre is.

2. Módszerek és eredmények

2.1. A kísérlet leírása

Többféle kovácstűzhely kialakítással és a technológiai paraméterek (pl. befűjt levegő mennyisége, faszén szemcsemérete, beadagolt szegek össz tömege stb.) változtatása mellett összesen nyolc szeghegesztős kísérletet végeztünk el. Ezek egyikét ez a videó mutatja be: <https://youtu.be/9C26O82j55w>. Mivel ebben a tanulmányban a metallurgiai folyamatok értelmezésére fókuszálunk, az elvégzett kísérletek közül csak egyetlen reprezentatív esetet mutatunk be részletesen.

A kísérlet során összesen 1,2 kg-nyi 65-ös szegeket (átmérő: 2,8 mm, tömeg: kb. 3 g) hegesztettünk össze egy földbe ástott oldalszeles kovácstűzhelyben, amelynek főbb méretei a *2A. ábrán* láthatóak. A felhasznált frakcionált faszén 6–25 mm-es szemcseméretű volt. A tűzhelyt 20 percig fával, majd további 20 percig már levegő befűvése mellett faszénnel fűtöttük elő (ennek során 2,5 kg-nyi faszénet használtunk fel).

A levegőbefűvés egy kisméretű centrifugál ventilátorral történt. Az előfűtés után került az izzó faszén kupac a süllyedő zóna tetejére, közel a homlokfalhoz (ld. *2B. ábra*) az első 200 g adagnyi szeg, amelyet fokozatosan, a süllyedésnek megfelelően faszénnel fedtünk be. Apránként adagoltuk a faszénet, összesen 400 g-nyit, ami kb. 12 percig tartott. Ezután újabb 200 g-nyi szeg következett, amire ismét apránként 400 g-nyi faszén. Összesen 6 adag szeg és 6 adag fa-



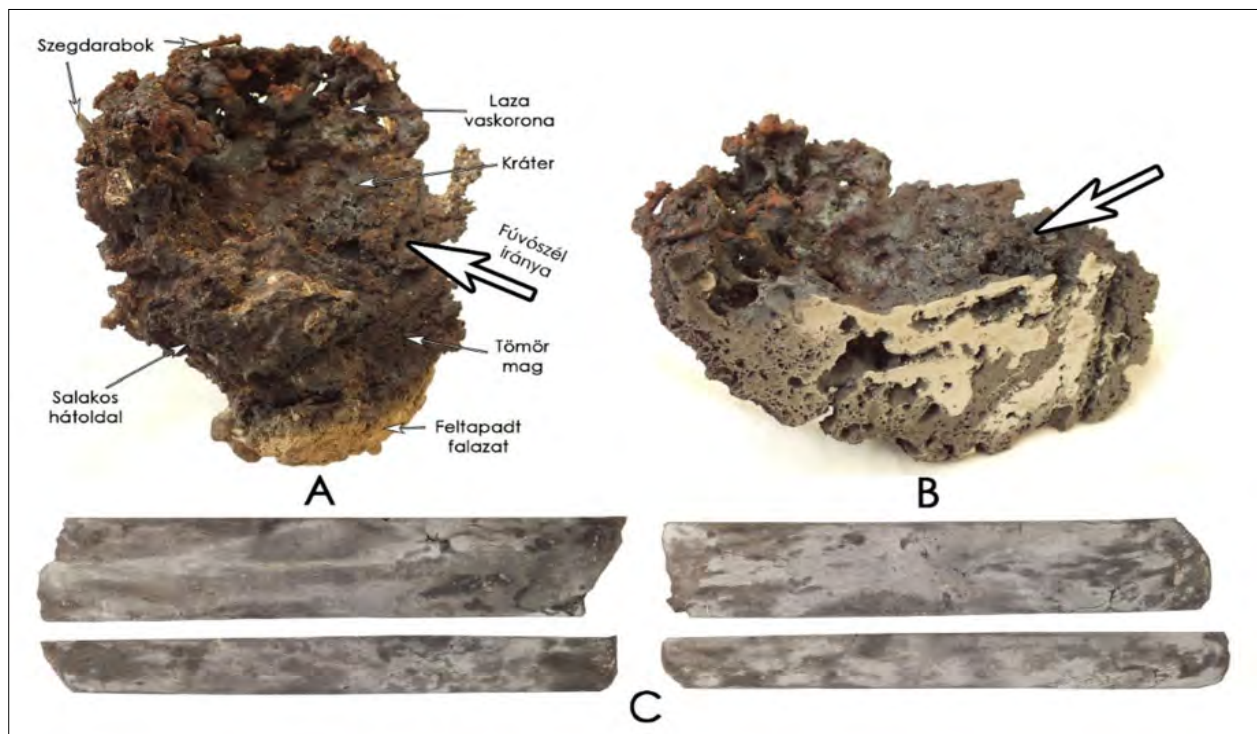
2. ábra. A szeghegestűs kísérlet oldalszeles kovácstűzhelyben. A) Méretek. B) Szegadag az izzó faszén kupac tetején. C) A fűvóka alatt-előtt összeállt salakos vasbuca a kísérlet végén

szén került be a tűzhelybe kb. 70 perc alatt. A befűjt levegő térfogatárama a kísérlet teljes időtartama alatt kb. 50 l/perc volt. Amikor az utolsó 400 g-os adag faszén elfogyott, lefűjtattuk a tüzet, azaz megvártuk, míg a homlokfal előtti faszén kupac leég annyira, hogy a vasbuca kitapintható legyen (ez a fűvósík feletti kb. 5 cm-es magasságot jelenti). Ezután a tűzhely inaktív zónájából kikapartuk az el nem égett faszenet, így láthatóvá téve a fűvóka alatt-előtt a falazatra feltapadt salakos vasbucát (ld. 2C. ábra). A megmaradt kb. 1 kg-nyi faszén levonásával összesen kb. 4 kg faszenet igényelt a kísérlet, amelynek időtartama összesen 130 perc volt.

2.2. Megfigyelések a vasbucán

A vasbucát ezután letörtük a falazatról, és lemértük a tömegét, amely 1,41 kg volt (a beadagolt szegeken

kívül a vasbucába salakként bekerült a tűzhelynek a fűvóka közelében leolvadó agyagfalazata, ill. kisebb tömegnövelő szerepe az elégett faszén hamujának is volt). A vasbucán megfigyelhető volt, hogy a nagyobb tömegű, tömörebb magja a fűvóka alatt helyezkedett el, a fűvósíktól kb. 8cm-es mélységig. A buca magján felül, koronaszerűen laza szerkezetű vasszivacs volt megfigyelhető, ez a szivacsosabb „vaskorona” a fűvóka orrpontjától félkör alakban kb. 6-7 cm-re alakult ki 3-4 cm-es vastagságban (ld. 3A. ábra) a fűvósíktól kb. 6 cm magasságig felnyúlva. A vasbuca alsó részén egy barna sáv jelzi a tűzhely feltapadt belső falazatának a töretfelületét. A vasbucán megmaradt szegdarabok csak a korona leghátsó és legfelső részén voltak néhol megfigyelhetők. A vasbuca fűvóka előtti kráteres része sok helyütt sima, égett felületű, más-hol viszont szivacsos, szemcsés a felület. A kráter alsó síkja a fűvósíkhhoz képest kb. 45°-os szögben állt, a



3. ábra. A) A tűzhelyből kivett vasbuca (a nyíl a fűvósík irányát jelöli). B) A vasbuca keresztmetszete. C) A vasbucából kikovácsolt vasrúd 10%-os nitállal makromarattva. A vasrúd 140×25×16 mm-es befoglaló méreteikkel rendelkezik

fúvósél tehát felfelé terelődött a kráterből. A kráter felülete a kísérlet során a fúvókán keresztül egy bottal vagy vaspálcával kitapintható volt.

A vasbucát ezután félbevágtuk, és az egyik fél vágási felületét megcsiszoltuk, ez látható a 3B. ábrán. Megfigyelhető, hogy a nagyobb vastartalmú, tömörebb rész a vasbuca tetején, a fúvóka orrpontjához közel, a fúvóka előtt-alatt található. A fúvóka orrpontjától távolodva a buca jóval salakosabb, kevesebb szénvasat tartalmaz.

Ugyanezt a kísérletet ismét elvégezve a kapott vasbucát már nem hagytuk kihűlni, nem vágtuk félbe, hanem többször újrahevítettük és tömörítettük, majd vasrúddá kovácsoltuk. A vasbuca tömege ekkor 1,45 kg volt (a kísérlet megismételhetőségét jelzi az előzővel közel azonos tömeg), a kapott vasrúd pedig 0,45 kg lett, ami az 1,2 kg-nyi felhasznált szeg figyelembe vételével 37,5%-os vaskihozatalt jelent.

Itt térünk ki arra, hogy egy másik kísérlet során 6–40 mm-es szemcseméretű faszénnel, 150 l/perces levegőmennyiséggel, 2,4 kg-nyi szegget 1,81 kg-os vasbucává hegesztettünk össze (ebben az esetben a salak jórészt elvált a vasbucától és lefolyt a medencébe), amelyből 1,07 kg-os vastömböt kovácsoltunk ki, ami 44,6%-os vaskihozatalt jelent.

A vastömb felületét felcsiszoltuk, és 10%-os nitállal makromarattuk a szén eloszlásának láthatóvá tételére érdekében (ld. 3C. ábra). A maratott felület alapján látható, hogy a szén eloszlása a vastömbben nagyon heterogén, megfigyelhetők kisebb-nagyobb mértékben szenet tartalmazó területek is. Azt tudjuk, hogy a kovácstűzbe adagolt szegek kémiai összetételüket te-

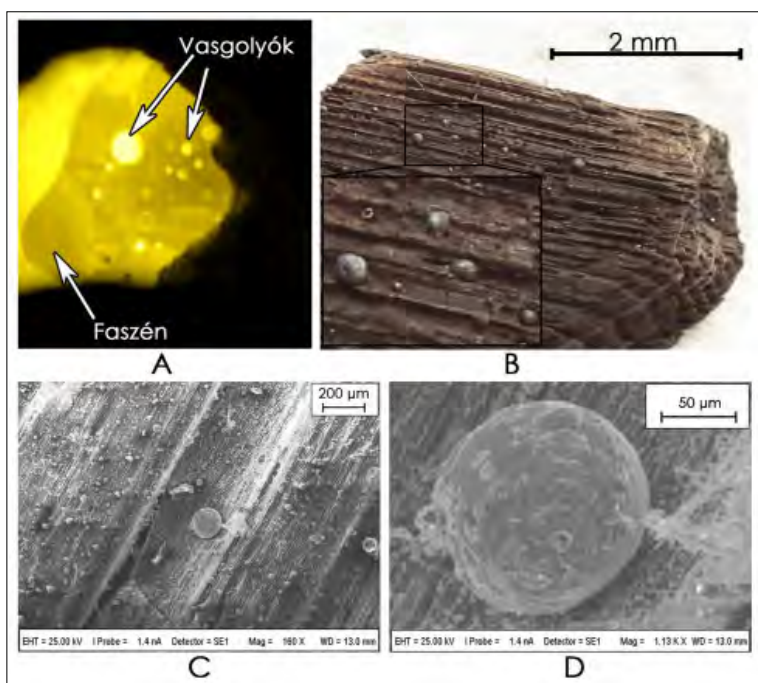
kintve kis széntartalmú lágyacélnak felelnek meg, így tehát megállapítható, hogy részleges cementálódás történt, a szén dúsulásának pontos mértékét azonban a kapott vastömb átlagos széntartalmának ismerete hiányában nem lehet megállapítani. Korábban végeztünk már hasonlóan kikészített felületű, edzett hőkezeltségi állapotú bucavastömbökön HRC keménységméréseket a különböző sötétségűre maródott területeken, így az egyes mérési pontokban megbecsülhető volt a széntartalom [4]. A módszer kalibrálására GDOES mérést is végeztünk néhány pontban. Ezek alapján elmondható, hogy a maratott felület sötétebb területeinek széntartalma 0,5–1,5% körüli, a világos területeken pedig legfeljebb pár tized %-nyi szén van.

2.3. Megfigyelések a kovácstűzben

A fúvókán keresztül XTW 11-es sötétségű hegesztő-üvegen keresztül benézve a fúvóka előtt, a faszén darabokra feltapadva apró, pár tized mm-es, esetenként 1-2 mm-es, fényesen izzó vasgolyók (ld. 4A. ábra), a faszén darabok között pedig lefelé csurgó folyékony salakcseppek voltak láthatók. Szegeket vagy azok felismerhető darabkáját a fúvósíkban egyáltalán nem lehet látni. Jól megfigyelhető volt az egymáshoz közel kerülő vasgolyók összehegedése, rögződése (a legnagyobb megfigyelt vasrögök kb. 5 mm-esek voltak), és a nagyobb rögök továbbgördülése a faszén felületén (erről videófilm: <https://youtu.be/GacWdCd2vPA>). A fúvókán keresztül egy vékony vascsipessel sikerült olyan faszén darabot kivenni a kovácstűzből, amelynek a felületét ilyen kis vasgolyók borították (ld. 4B.

ábra). Ezek a kis vasgolyók a faszénhez csak gyengén voltak hozzátapadva, egy tű hegyével könnyedén ki lehetett ezeket mozdtítani a helyükről. Néhány ilyen faszén darabot elektronmikroszkóp (SEM) alatt is megvizsgáltunk (ld. 4C. és 4D. ábra). A SEM-képeken jól látható, hogy a vasgolyók teljesen gömb alakúak, és többségük nagyon apró, mindössze pár tíz mikrométeres.

A kovácstűz izzó faszén kupacának tetejére adagolt szegek gyorsan felhevültek, majd lejjebb süllyedve a fúvósík közelébe a vasanyag szikrázó égése (hiccelése) is elkezdődött, a tűz lángjában apró fényes, szétágazó szikrák jelentek meg. A szikrák többsége azonban nem jutott ki a tűztérből, mivel a faszén felülről folyamatosan pótolva az izzó, hiccelő szegeket faszén réteg fedte. A kovácstűz égésterében izzó, részben elégett, egymáshoz hegedt szegekből néhány alkalommal vascsipessel sikerült felülről mintát venni. Az 5A. ábrán mutatott



4. ábra. A) A fúvókán keresztül készített hegesztőüveges fénykép. B) Faszén minta vasgolyókkal (makrofotó). C) és D) SEM-képek a vasgolyókról



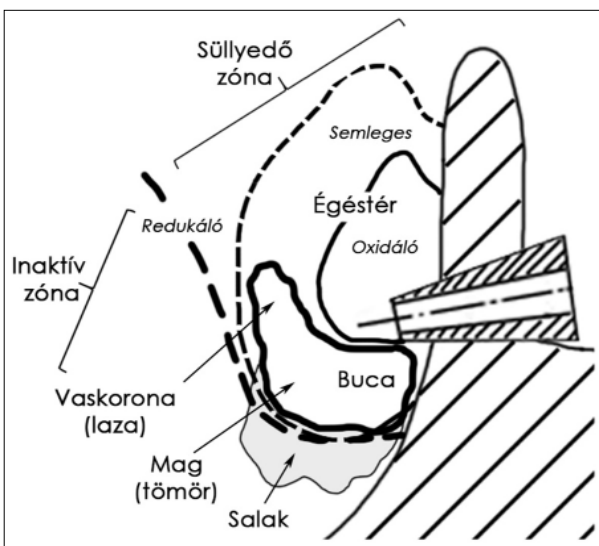
5. ábra. A) A kovácstűz fűvósíkja fölül kivett, részben elégett, összehegedt szegek. B) Szivacsos felrakódás a szegek felületén. C) Részben elsalakult szegek

mintán látható, hogy az összehegedt szegek részben elégték, hosszuk és átmérőjük csökkent, illetve szivacsos felrakódások voltak megfigyelhetők rajtuk, ezek közül egyet közlelről mutat az 5B. ábra. Ezek a szivacsos felrakódások alapvetően fémeseek, megcsiszolva ezeket fémtiszta felületet kapunk, kevés salakot tartalmaznak. Egy korábbi, az acél kovácstűzbeli elézésének metallurgiai folyamatairól szóló cikkünkben már bemutattunk hasonló szivacsos felrakódásokat S235-ös anyagminőségű, 10 mm-es négyzetvasak felületén [5]. A szegek égése során a felület frontális oxidációjával nagy mennyiségben keletkezik olvadt, vasoxidban dús salak is, amely részben feltapad a szegekre (amint pl. ahogyan az 5C. ábrán látható), részben pedig lecsöppen (a fűvókán keresztül betekintve láthatók voltak a faszén darabok között folyékony salakcseppek is).

3. Értékelés

3.1. Atmoszféraviszonyok az oldalszeles kovácstűzben

Az oldalszeles kovácstűzben a szeghegesztős kísérletek során a vasbuca kialakulásához vezető metallurgiai



6. ábra. Atmoszféraviszonyok és a vasbuca helyzete az oldalszeles kovácstűzben

folyamatok értelmezéséhez mindenekelőtt tekintsük a 6. ábrát, amely a kovácstűz atmoszféraviszonyait és a vasbuca helyzetét mutatja be. A kovácstűzben három különböző atmoszférájú térrészt különböztetünk meg. Közvetlenül a fűvóka orrpontja körül alakul ki az oxidáló atmoszférájú zóna, amelyet gyakorlati megfigyeléseink alapján úgy jellemezhetünk, hogy ebben nemcsak a faszén, hanem a vas is elég. A nagyobb kiterjedésű semleges atmoszférájú zónában a vasfázis nem ég el, de a faszén igen. Ez a két zóna alkotja a kovácstűz égésterét. Ezen kívül található a redukáló atmoszférájú zóna, amelyben már a faszén sem ég el. A redukáló atmoszférájú zónát két részre lehet osztani. Felül, elöl található a süllyedő zóna, amelyben az elegyoszlop lefelé, az égéstér irányába mozog. A redukáló zóna alsó, hátsó része pedig inaktív faszénből áll, amely nem végez mozgást.

A kovácstűzben a vasbuca a fűvóka alatt, a semleges atmoszférájú zóna alsó határán kezd el kialakulni. Az eddig lesüllyedő és elégtő faszén szemcséken lévő vasgolyók és vasrögöcskék összehegedésével, növekvő vasszivacs, vasbuca jön létre, amelyhez a felülről érkező újabb faszén darabokon lévő vasgolyók, illetve a szabadon ide hulló, korábban a vasgolyók összehegedésével kialakult nagyobb vasrögök hozzáhegednek. A növekvő vasbuca alatt a faszén az ott lévő redukáló atmoszférán nem tud elégni és egyfajta ágyazatot képez, amelyen keresztül a vasbucából a salak nagyobb része lecsurog a kovácstűzhely medencéjébe, így elválva a vasbucától. A vasbuca tömör magja közvetlenül a fűvóka alatt helyezkedik el, a laza vaskorona pedig a semleges zónában, a fűvókától távolabb előtte és felette (ld. 6 ábra).

A vasbuca a 2.2. szakaszban és a 3A. ábrán bemutatott alakjából következtethetünk arra, hogy 50 l/perces levegőtérfogat-áramnál, 25mm-es fűvóka belső átmérőnél és 6–25 mm-es faszén szemcseméretnél az oxidáló atmoszférájú zóna a fűvóka orrpontjától kb. 6–7 cm-es mélységig ér el vízszintesen. A kovácstűzbe tett szegek kb. a fűvóka orrpontjától 10–12 cm-es magasságban kezdenek el égni, így hozzávetőlegesen ennyi az oxidáló zóna magassága. A semleges

atmoszférájú zóna kb. 10 cm-es mélységére szintén a vasbuca alakjából lehet következtetni. Ezek a méretek a befűjt levegő térfogatáramának növekedésével, illetve nagyobb szemcseméretű, a légáramlást kevésbé fojtó faszén esetén nyilvánvalóan növekednek, így nagyobb méretű vasbuca tud kialakulni.

3.2. A szén és vas stabilitási viszonyai a kovácstűzben

A kovácstűz makroegyensúlyi helyzetének vizsgálata nem választható el a rendszer kémiai anyagát alkotó C, CO, CO₂, O₂ és Fe anyagok lokális koncentrációjának ismeretétől. Az ismereteket ki kell terjeszteni a hőmérsékletre is, a nyomás szerepét viszont nem hangsúlyozzuk, mivel általában 1 bar nyomású izobár rendszerekről van szó. Mint ahogy ezt fentebb láttuk, a rendszert képező gázfázis általános vegyi összetétele általában ismert, melyet a fűvóka irányának megfelelően felvett tengely hosszának függvényében célszerű vizsgálni a 7. ábrának megfelelően.

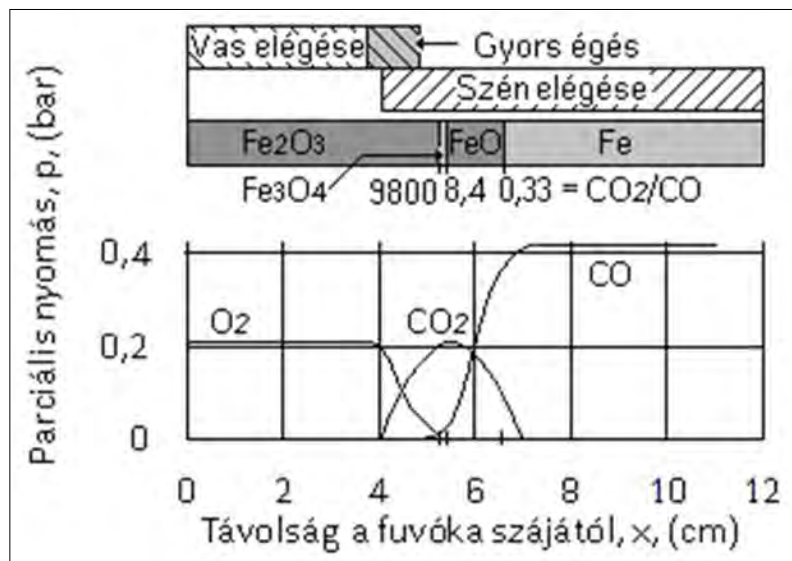
A 7. ábra egy általános koncentrációeloszlási képet mutat, a fűvókától felvett önkényes távolság függvényében. Az ábráról hiányzó hőmérsékletről azt kell tudni, hogy annak értéke egyrészt a távolság függvényében, másrészt a befűjt levegő térfogatáramának függvényében változik. Az előbbi összefüggésben a hőmérséklet maximumot mutat azon a helyen, ahol a CO₂-nak is maximumértéke van, másrészt a térfogatáram növelése esetén a hőmérséklet megnő, és az égés fókuszpontját jelentő CO₂_{max}-értékek közelebb kerülnek a fűvóka szájához.

A rendszerben levő szilárd anyagok, mind a szén és a vas egyaránt adott esetben oxidálódnak, máskor (a redukáló viszonyok között) megőrzik elemi állapotukat. A két anyag égési feltételeire ugyanaz a három alapfeltétel együttes megléte szükséges: az éghető anyag, az égést biztosító közeg és az anyag gyulladási

hőmérsékletét elérő hőmérséklet. A szén vagy faszén vagy a kokszt gyulladási hőmérséklete könnyen elérhető (faszén esetében 250–280 °C). Általában ismert, hogy a fa (vagy pl. az ásványi szén) lángjelenség kíséretében ég el, amelyet a tüzelőanyagból felszabadult illóanyagok égése okoz. A faszén (és a kokszt is) az előbbieknél sokkal kevesebb illóanyagot tartalmaz, lángjelenség az átmenetileg képződő CO utánégésének köszönhető.

A kovácstűzhelyekben a vas gyulladása és égése már sokkal komplikáltabb. Kis széntartalmú szénacélok esetén az égés kisebb hőmérsékleteken egy lassú folyamattal kezdődik, melynek égésterméke a reve különböző vasoxidokból áll, melyek egyenletesen, néhány tized mm vastagságban bevonják a vastárgyat (frontális oxidáció). Az idő növekedésével az oxidáció sebessége parabolikusan, a hőmérséklet növelésével pedig exponenciálisan nő, és növekvő mértékben kiterjed a felület közeli szemcsehatárokra is (intergranuláris oxidáció). Az égés sebessége az oxigén koncentrációjával arányosan nő, eltekintve az exoterm folyamat hőmérséklet-növelő hatásától. A fehérizzás kb. 1350 °C-os hőmérsékletén indul meg a szikraképződéssel járó ún. hiccélési folyamat. A jelenség megértése szempontjából fontos tudni, hogy a reve két fő alkotója a vasoxidul (FeO) 1377 °C-on olvad, a magnetit (Fe₃O₄) pedig 1597 °C-on. A wüsztit-magnetit fázisokból álló reve a fehérizzáson megolvad, a feloxidálódott szemcsehatárokon megjelenő olvadt reve hatására a felület közeli szemcsék szikrázva kilökődnek a munkadarabból, elkezdődik a hiccélés, a munkadarab gyors, szikrázó égése.

A 7. ábrát értelmezve megállapíthatjuk, hogy a kovácstűzhelybe benyúló vastárgy lassú oxidációjának megvannak a feltételei, ugyanis a revésedés kezdeti hőmérséklete kb. 600 °C. A lassú oxidáció mindaddig tart, amíg O₂ van a rendszerben. Ebből a szempontból a CO₂ oxidáló hatása már nagyságrenddel kisebb. Az ábra szerint a vastárgy gyors oxidációja azon a helyen várható, ahol az oxigéntartalom még nagy és a hőmérséklet már eléggé nagy, vagyis valahol az O₂-CO₂ gázelegy közös területén. A fűvóka tengelye mentén a fűvóka szájnyílásától távolodva a rendszerben megjelenik először a CO₂ és utána fokozatosan a CO. A két gáz arányától függően, a Fe₃O₄, majd a FeO-, végül a Fe-fázis lesz a termodinamikailag stabil anyag. Az itt nem részletezett számítások eredményei alapján megállapítható – és ez a 7. ábrán is megfigyelhető –, hogy 1200 °C-on a színvas stabilizálásához



7. ábra. A fűvóka előtti tér gázainak koncentrációs viszonyai

0,33-nál kisebb CO_2/CO arány szükséges, a wüsztitéhez 8,4, a magnetitéhez pedig 9800, ami egyébként megfelel a közismert Fe-O-C rendszer 1200 °C-os hőmérsékletéhez tartozó egyensúlyi vonalairól leolvasható 25% CO_2 – 75% CO , 89,4% CO_2 – 10,6% CO , valamint 99,888 CO_2 – 0,012% CO értékeknek [6].

3.3. A vasbuca kialakulásának metallurgiai folyamatai az oldalszeles kovácstűzben

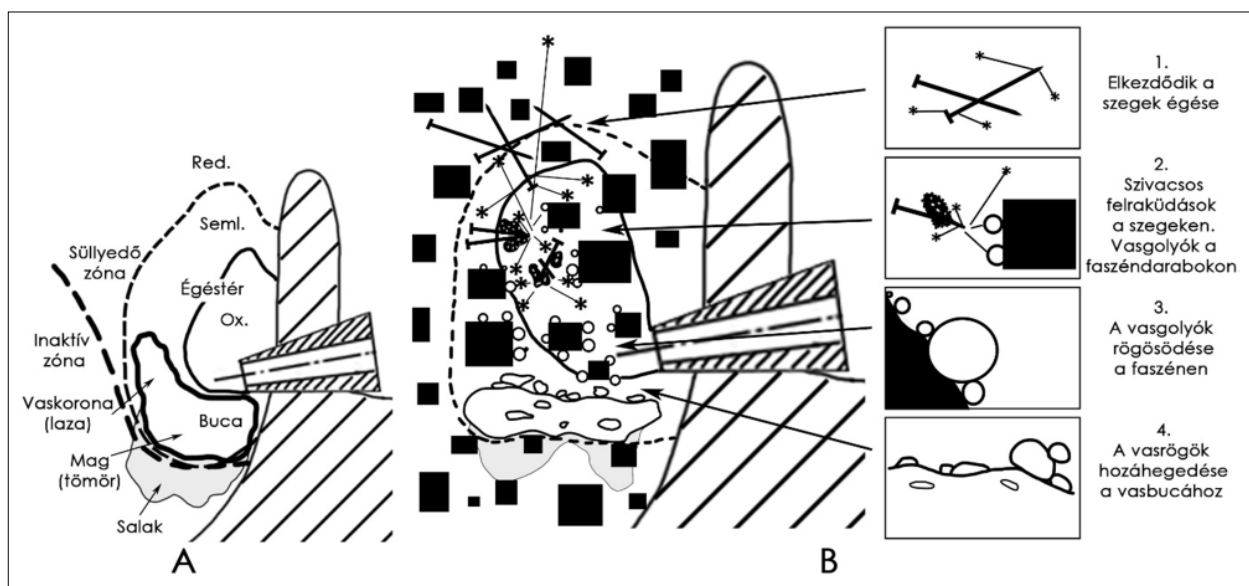
A metallurgiai folyamatok értelmezéséhez, azaz a vasbuca szegekből történő kialakulásának megértéséhez tekintünk a 8. ábrát, amely a kovácstűzbe beadott szegek útját mutatja a vasbuca kialakulásáig. Az izzó faszén kupac tetejére rakott vékony szegek hevülni kezdenek, majd lejjebb süllyedve, beérve az oxidáló atmoszférájú zónába, égni kezdenek (ezt mutatja a 7. ábra 1. kis képe). Az égő szegek szikrákat vetnek ki, hiccnelnek. A szikrák valójában kilövellő vasszemcsékből állnak, amelyek valamennyi olvadt, nagy vasoxidtartalmú salakot is tartalmaznak (részletesen ld. [5]).

A szegekből kilépő szikrák útja három féle lehet (ld. a 8. ábra 2. kis képe). Kirepülhetnek a kovácstűzből, és égésük során teljesen salakká válnak. Ilyenkor magnetitgolyócskák keletkeznek belőlük, ilyeneket mutattunk be egy korábbi cikkünkben [4]. A másik lehetőség, hogy rövid időre felrakódnak magukra a szegekre (azok kisebb hőmérsékletű és/vagy kevésbé oxidáló atmoszférán lévő részére), ilyenkor alakulnak ki a korábban tárgyalt szivacsos, fémes-salakos felrakódások (ld. pl. az 5B. ábrán), amelyek végül újra hiccelve elégnek (esetleg a nagyobb méretűek, kisebb fajlagos felületüknel fogva megúszhatják a teljes újra elégést, és egyfajta tixomoldingként lecsöppenhetnek a vasbucára). A harmadik lehetőség, hogy a szikrák

a faszén darabok felületére tapadnak fel. Ilyenkor a szikrákban lévő vasszemcsék égése folytán zajló salakká válás leáll, azok a faszén felületén felpadva haladnak tovább lefelé. Tulajdonképpen tehát a szegek elégésével keletkező szikrák végül szinte mind a faszén darabok felületén gyűlnek össze, és csak elenyésző részük jut ki a kovácstűzből. (Erre utal az, hogy a beadott szegek össztömegénél nemhogy kisebb, de valamennyivel nagyobb tömegű vasbucák keletkeztek).

Itt kell megjegyezni, hogy a vasszemcsék égése a kovácstűzben nyilvánvalóan nem jár teljes elsalakkalással, tehát a vasszemcsék nem ég el teljes mennyiségében vasoxiddá, ugyanis a kísérletek során mindig kaptunk jobb-rosszabb vaskihozattal vasbucát. Azonban a nagy fajlagos felületű szegek teljes térfogatukban szikrákká égnék el (elhiccelnek). Erre utal az, hogy a vasbucákban szegeket, szegdarabokat csak a vaskorona legfelső, leghátsó részén lehetett néha látni, ahol az atmoszféra- és a hőmérsékleti viszonyok nem kedveztek a szegek teljes elégésének. (Érdekes lenne a kísérletet elvégezni kisebb fajlagos felületű vasdarabokkal is, amelyek nem hiccelnének el teljes térfogatukban). A szegek elégése során nemcsak szikrák lökődnek ki, hanem a felületük frontális oxidációja révén sok folyékony, vasoxidban dús salak is keletkezik (ilyen jórészt elsalakult szegek láthatók az 5C. ábrán). Ez a salak nagy hőmérsékleten körbe folyja a felületet, majd elválik attól, és a faszén darabok között lefelé csöpög. Megfigyeléseink alapján feltételezzük, hogy ennek az olvadt, vasoxidban dús salaknak a színvassá történő visszaredukálódására sem a faszén felületén, sem pedig az atmoszféra által (sem direkt, sem indirekt módon) sincs nagy volumenben lehetőség.

A faszén felületére került vasanyag, a vasgolyócskák tehát mintegy „megmenekülnek” a teljes salakká



8. ábra. A szeghegesztős kísérlet főbb metallurgiai folyamatai

válástól (ezt mutatja a 7. ábra 3. kis képe), sőt a faszén felületére jutott szikrák vasoxidtartalma visszaredukálódik színvassá (erről a folyamatról részletesebben a 3.2. szakaszban szóltunk). Ezekből a kis vasgolyócskákból tud összeállni maga a vasbuca. Ahogyan a faszén ég, csökken a felülete, a rajta lévő vasgolyók egyre közelebb kerülnek egymáshoz. Így a faszén felületén a vasgolyók egyesülnek, növekszenek, rögződnek. Ha egy vasrög kellően nagyra nő, a súlyánál fogva elválik a faszéntől és leesik (erre látunk több példát ennek a videónak az első másodperceiben: <https://youtu.be/GacWdCd2vPA>) és hozzáheged a vasbuca felületéhez, mégpedig abban a 3A. ábrán bemutatott kráterben, amelyet a hegedést elősegítő olvadt salakfilm borít. A faszén darabok teljes elégése folytán végül minden vasgolyó a növekvő vasbucához heged, ezt szemlélteti a 7. ábra 4. kis képe.

A vasbuca magja és koronája között mutatkozó jelentős sűrűségkülönbség oka mindezek alapján feltételezhetően a következő. A fúvóka közelében, az oxidáló atmoszférában a faszén szemcsék felületén lévő vasgolyók égésük folytán folyékony halmazállapotban hegednek hozzá a szilárd halmazállapotú, növekvő bucamaghoz, amely így sokkal tömörebb lesz (a felrakó hegesztés technológiájával lenne itt párhuzam vonható). Viszont a fúvóka orrpontjától távolabb, a semleges atmoszférájú térrészbe süllyedő

vasgolyók nem égnék (de az atmoszféraviszonyoknak megfelelően nem is szenülnek), és szilárd halmazállapotban diffúziós hegedéssel hegednek össze, így építve fel a sokkal lazább vaskoronát. A sűrűségkülönbség másik oka az lehet, hogy az oxidáló zónában a vasfázis részben elsalakul, így a buca magjába több salak kerül, ami segíti a vasgolyócskák, rögöcskék összehegedését.

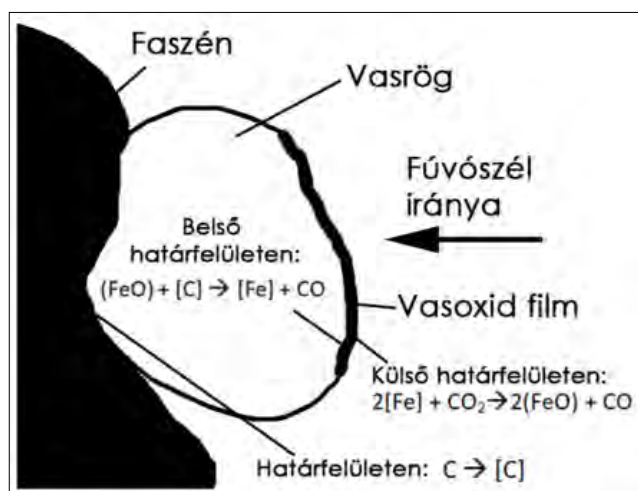
3.4. Metallurgiai folyamatok a vasgolyócskák, a faszén és az atmoszféra között

Az eddig elmondottak és a megfigyeléseink alapján úgy véljük, hogy a vasbuca kialakulásában kulcsszerepe van a faszén felületén megfigyelt kis vasgolyócskáknak. Metallurgiai szempontból fontos kérdés, hogy ezek szilárd vagy folyékony halmazállapotúak-e. A folyékony halmazállapotra utal egyrészt a tökéletes gömb alakjuk, másrészt a hegesztőüvegen át látott színhőmérsékletük (ld. 4. ábra). Rövid számítással is igazoljuk feltevésünk helytállóságát, amivel bemutatjuk, hogy az egységnyi tömegű vas oxidációja révén felszabadult hőmennyiség többszöröse az ugyanolyan tömegű vasnak pl. az 1200 °C-os aktuális hőmérsékletről az olvadáspontig, és onnan az 1600 °C-ra való felhevítéséhez szükséges hőnek. Ez a q arány a következő:

$$q = \frac{\Delta H_k}{c_{p, sz} (1536 - 1200) + \Delta H_{olv} + c_{p, olv} (1600 - 1536)}, \quad (1)$$

ahol ΔH_k és ΔH_{olv} a FeO moláris képződéshője, ill. olvadáshője, $c_{p, sz}$ és $c_{p, olv}$ a szilárd és az olvadt vas moláris fajhője.

$$q = \frac{264850 \text{ J/mol}}{35,2(1536 - 1200) + 13580 + 46,6(1600 - 1536) \text{ J/mol}} = 9,2. \quad (2)$$



9. ábra. A faszén felületén lévő vasgolyókhöz köthető metallurgiai folyamatok

1 mol vagy 1 kg vas oxidációja során képződő hőmennyiség tehát kb. 9-szer több, mint ami az 1200 °C-ra előmelegített vas megolvasztásához szükséges. Amennyiben a számítást a 0 °C kiinduló állapotból számítva megismételjük, a többelhőmennyiség relatív értéke 3,2. Természetesen némi magnetit megjelenése módosítja az eredményeket.

Tehát bár a kovácstűzhelyben kialakuló vasbuca szilárd halmazállapotú, a hozzáhegedő vasgolyók folyékonyak és a hegedést megelőzően néhány tíz másodpercet, de akár percekig is eltöltenek folyékony halmazállapotban. Feltételezzük, hogy a folyékony halmazállapotot a faszén szemcsék között áramló oxidáló atmoszférában a vasfázis erősen exoterm égésével termelődő hő tartja fent, a vasfázis égésével keletkező szintén folyékony vasoxid viszont folyamatosan vissza is redukálódik színvas-

sá, a redukciót pedig a folyékony vasfázis faszénből felvett széntartalma teszi lehetővé. Ezt szemlélteti a 9. ábra. (A vasfázis szénttartalmának a vasoxidban dús salakra gyakorolt redukáló hatása figyelhető meg ebben a videóban: <https://youtu.be/WGvC8uxPCow>, a videó elején egy salakcsepp elválk és lecseppen az égő munkadarab felületéről, a videó második felében viszont a következő salakcsepp „visszaszívódik” a szivacsos felrakódásra.)

A felvázolt metallurgiai folyamatok alapján azt is feltételezhetjük, hogy a vasgolyócskák széntartalma nagyon alacsony (semmiképpen sem nyersvas cseppecskékről, hanem acélcseppecskékről van szó), mert a szabad, faszénnel nem érintkező felületüket vasoxid borítja, amely folyamatosan dekarbonizál. Ha egy vasgolyócska szabad felülete kevésbé oxidál, esetleg redukáló atmoszférába kerül, akkor természetesen megindul a cementálódása, azonban ilyenkor az égés megszűnésével feltételezhetően a vasgolyócska halmazállapota szilárd lesz. (Amikor például a 4B. ábrán bemutatott minták vételezése miatt a levegőbefűvást pár másodpercre szüneteltetni kellett, megfigyelhető volt, hogy az addigi színhőmérsékleti különbség a faszén és a vasgolyók között megszűnik, és a vasgolyók a faszénnel azonos hőmérsékletűvé válnak, és feltételezhetően meg is szilárdulnak.) Mivel a kovácstűz égésterében meglehetősen sztochasztikus viszonyok között süllyednek a faszén felületére felapadt vasgolyócskák (pl. bizonyára vannak olyanok is, amelyek kevésbé oxidáló atmoszférában, pl. „fűvószélárnyékban” haladnak), ezért már a vasbucához hegedés előtt különböző szénttartalmúakká válnak. (Magában a növekvő vasbucában is végbemehetnek dekarbonizációs-cementációs folyamatok, de ezeknek a kis fajlagos felület már nem kedvez.) Alapvetően ezzel magyarázható a vasbucában a heterogén széneloszlás, amelyet a 3C. ábra mutat.

4. Összegzés, következtetések

A szeghegesztős kísérletek legfontosabb eredménye a vasbuca kialakulásának mechanizmusával kapcsolatosak:

- A vasbuca kovácstűzbéli elhelyezkedésére jellemző, hogy a fűvóka alatti semleges atmoszférájú zóna alsó részén az el nem égő faszén ágyon ül fel. A vasbuca szerkezetére jellemző, hogy a fűvóka alatti mag része tömör, a fűvókától a vízszintes síkban körkörösén távolabb első és a magasabban lévő vaskorona része viszont laza szerkezetű. Közvetlenül a fűvóka orrpontja előtt-alatt a vasbucának van

egy nagyjából sík, kráteres felülete, amelyet az oxidáló atmoszférájú zóna alsó része határol.

- A kovácstűzbe adagolt szegek teljes térfogatukban elhiccelnek: részben elsalakulnak, részben pedig fémes vasat tartalmazó szikrák lövellnek ki belőlük.
- A szegek égésekor kilövellő szikrák a faszén felületén összegyűlnek, szabályos gömb alakú vasgolyókat alkotnak, a faszén elégésével csökkenő felület miatt egymáshoz közeledve rögzödni kezdenek, majd egy bizonyos méretet elérve a szilárd vasbucára esnek, és ahhoz hozzáhegednek.
- Színhőmérsékletük és tökéletes gömb alakjuk miatt feltételezzük, hogy a faszén felületén megfigyelt vasgolyók folyékony halmazállapotúak.
- A kísérletek során a technológiai paraméterektől függően kb. 35–45%-os vaskihozatal volt elérhető.

Köszönetnyilvánítás

A TKP-6-6/PALY-2021 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Pleiner R. (2006): Iron in Archaeology – Early European Blacksmiths. Praha, AU AVČR
- [2] Gömöri J. (2000): Az Avar kori és Árpád-kori vaskohászat régészeti emlékei Pannóniában. Kiadja a Soproni Múzeum Régészeti Gyűjteménye és az MTA VEAB Iparrégészeti és Archeometriai Munkabizottsága, Sopron.
- [3] Török B., Barkóczy P., Kovács Á., Költő L., Fehér A., Szőke B. M. (2018): Pannóniai kora középkori ékelt vasbucák összehasonlító archeometriai vizsgálata. BKL – Kohászat, 151(3), 1–3.
- [4] Thiele Á., Török B. (2022): A possible medieval recycling technique – smelting iron using hammerscale. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1246, 012008.
- [5] Thiele Á., Hári L., Magyar D. (2020): Az acél kovácstűzbéli elégésének metallurgiai háttere – damasz-kolt anyagokon kialakuló felületi hibák magyarázata. Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat 153(5), 4–9.
- [6] Óvári A. (1985): Vaskohászati kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, p. 83