

THIELE ÁDÁM – HÁRI LÁSZLÓ – MAGYARI DOMONKOS

Az acél kovácstűzbeli elégésének metallurgiai háttere – damaszkolt anyagokon kialakuló felületi hibák magyarázata

Dr. Thiele Ádám 2010-ben okleveles gépészmérnökként végzett, majd 2015-ben PhD-fokozatot szerzett a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki karán. Jelenleg egyetemi adjunktusként az Anyagtudomány és Technológia Tanszék munkatársa, kutatási területe az archeometallurgia. 2004 óta egyéni vállalkozóként kovácsol.

Dr. Hári László 1974-ben az NME KFFK főiskolán metallurgus üzemmérnöki, majd 1979-ban az NME Kohómérnöki Karán okl. kohómérnök képesítést szerzett. 1986-ban dr. univ, 1998-ban PhD-minősítést nyert. A dunaújvárosi főiskolán hosszú ideig a Fizikai-kémia, a Nyersvasgyártás és az Acélgyártás c. tárgyak előadója. Jelenleg nyugdíjas, emellett külső óraadó a Miskolci Egyetem Metallurgiai Intézetében. Kutatási területe a kohászati folyamatok szimulációja.

Magyari Domonkos jelenleg a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen a Gépészmérnöki Kar Gépészmérnöki Szak Anyagtechnológia specializáció hallgatója. A Gépészmérnöki Karon működő Alakítástechnikai Szakosztály elnöke. Az anyagvizsgálat, hőkezelés és szabadalakító kovácsolás iránt érdeklődik.

A kovácstűzben túlhevített damaszkolt anyagoknál (pl. a kovácshegesztéshez történő hevítéskor) a későbbi felületkikészítés során gyakran jelentkezik egy jellegzetes felületi hiba. Ez a hiba a mintázat egy adott területen való eltűnésével jár, fényes, foltszerű megjelenésű. Az elvégzett kísérletek és anyagvizsgálatok alapján úgy véljük, hogy a munkadarab elégése, hícclése során szivacsos felrakódások alakulnak ki a munkadarabból kilövellő szilárd acélszemcsék összehegedésével, ezt a szivacsos felrakódást a munkadarab kovácsolásakor rendszerint vissza-kovácshegesztjük a felületbe. Damaszkolt termékek esetén viszont ez a maratás után láthatóvá váló, az értéket nagyban csökkentő mintázati hibához vezet. A cikkben bemutatjuk az acél kovácstűzbeli elégésének, hícclésének általunk feltételezett metallurgiai hátterét, és azokat a fizikai-kémiai folyamatokat, amelyek a damaszkolt anyagok esetén a később mintázati hibát okozó, szivacsos felrakódások kialakulásához vezetnek.

The metallurgy of the burning of steel in the forge fire – explanation of pattern failures in pattern-welded materials

Due to overheating during forge welding, shiny and patchy pattern failures might appear on the surface of pattern-welded objects. Over 1350°C, when steel starts to burn and spark in the forge fire, a spongy structured sprayed steel lump is formed by diffusion-welded steel sparks. This spongy lump is often forge-welded again to the surface resulting in a well visible and depreciative pattern failure after etching. This paper tries to describe the detailed physical-

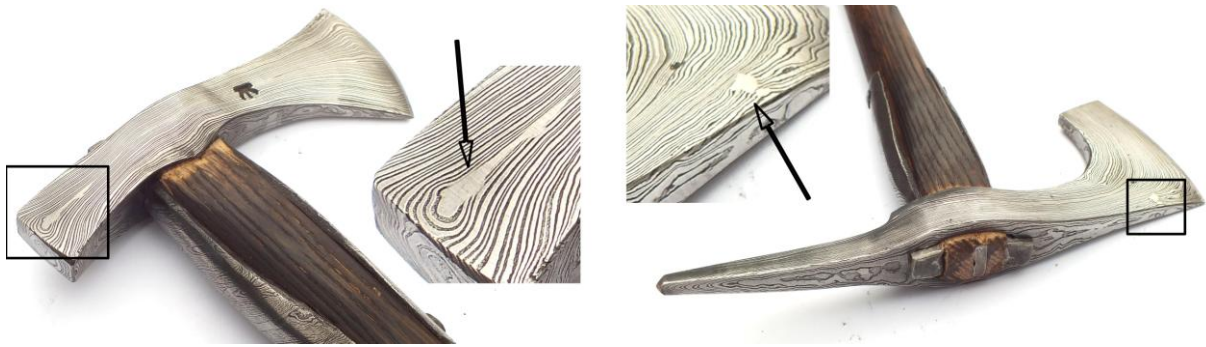
chemical conditions of the burning of steel in the forge fire and the forming of the spongy lump on the surface of the work piece.

Bevezetés

A lágyvas (kis karbontartalmú bucavas, amely nem edzhető) és acél (nagy karbontartalmú bucavas, amely edzhető) rétegek összekovácsolásával készült réteges kompozitok („piled composites”) a damaszkolt pengék elődjeként már az idősámításunk előtti néhány században megjelentek Európában [1]. Ennek az eljárásnak csak a mechanikai tulajdonságok javítása volt a célja, nem pedig szép felületi mintázat kialakítása. A díszítő funkció csak később, a 2. századtól jelent meg, amikor pengék készítéséhez a lágyvas és acél mellett egy speciális, ma már nem létező vasötvözetet, foszforvasat (nagy, kb. 0,4-1,5%-os – tömegszázalékos – foszfortartalmú bucavas) is elkezdtek felhasználni [2]. A damaszkolt kardpengéknek csak a középső része, késeknél pedig csak a penge foka volt damaszkolt, később pedig megjelentek a damaszkolt fémberakással („inlaid”) díszített pengék is. A damaszkolt sáv általában 7-14 rétegű és csavart mintázatú volt [4] és a penge élét többnyire acélból kovácsolták hozzá [3]. A foszforvassal történő díszítés egyszerűbb megjelenési formája volt, amikor csak egy vagy két foszforvas réteget („stripped”) vagy egy fogazott mintázatú („serrated”) foszforvas réteget kovácsoltak be a pengébe [5]. A damaszkolás a kardoknál egészen a 12. századig, késeknél pedig a 14. századig elterjedt díszítési technika maradt [2].

Történelmileg hitelesen, bucavasakból előállított damaszkolt próbatesteken elvégzett mechanikai anyagvizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy a közhiedelemmel ellentétben, a középkori Európában elterjedt damaszkolás elsődleges célja a díszítés, nem pedig a pengék mechanikai tulajdonságainak javítása volt, azokra előnyös hatást nem gyakorolt [6]. Ennek oka, hogy a damaszkolt pengékben díszítő céllal felhasznált tipikus foszforvas nagyon rideg, a szívósságát és alakíthatóságát jellemző mérőszámainak mindegyike [ütőmunka (KV), fajlagos törési munka (W_c), szakadási nyúlás (A) és kontrakció (Z)] közel nulla. Ebben a kontextusban a középkori damaszkolás díszítő szerepe még inkább felértékelődik.

Thiele Ádám (a Bucavasgyúró) immár több mint két évtizede készít damaszkolt késeket, fokosokat a szakmában nagyon elterjedt C15 + 90MnCrV8 vagy C45 + 90MnCrV8 anyagpárosításokkal dolgozva. A damaszkolt anyagainál kezdettől fogva megfigyelt egy gyakran jelentkező, jellegzetes felületi hibát, a felület kikészítése (csiszolása és maratása) után a mintázat egy adott területen eltűnt, ld. az 1. és a 2a ábrát.



1. ábra. Kiseb mintázati hibák megjelenése damaszkolt fokosoknál.

A hiba kiterjedése általában néhányszor tíz négyzetmilliméteres, de rosszabb esetben a négyzetcentiméteres nagyságrendbe is eshet. A hibás területen a mintázat helyett a szokásos 1-2 perces, kb. 60-80°C-os kénsavas maratás után egy világos folt látható, amelynek alakja változó. A hibával nem érintett területen a maratás után a felület a mintázatnak megfelelően „recés” lesz, mert a 90MnCrV8 pár századmilliméterrel mélyebbre maródik, mint a C15 vagy a C45, így a damaszkolt anyag szép, réteges makroszerkezete láthatóvá, sőt tapinthatóvá válik. A hibás területen az anyag alig maródik, hasonlóan a C15-höz vagy C45-höz, és maratás után a kikészített felületből kiemelkedő „szigetként” marad meg.

A leírt felületi hibák bizonyára a korabeli damaszkolási technikánál, másféle vasötvözetek felhasználáskor is jelentkeztek (ma azonban ezek már nem láthatók a több száz, vagy akár ezer éves, korrodálódott damaszkolt pengéken, de a jelenség ismert lehetett az akkori kovácsok számára is) és jelentősen csökkenthették a damaszkolt pengék, vagy a damaszkolással díszített egyéb tárgyak értékét, így nagyon fontos lehetett ezek elkerülése.

A felületi hibák kialakulása a kovácshegesztés előtti túlhevítésre vezethető vissza. Mivel a damaszkolt anyagok kovácsolása során kis hőmérsékleten a rétegek szétválása könnyen megtörténhet (delamináció), az alakítást a kovácshegesztési hőmérséklet felső határáról (kb. 1350°C) kell elkezdni. Ilyenkor azonban a munkadarab sarkai, élei, vékonyabb részei a kovácstűzben könnyen túlhevülhetnek, eléghetnek, „elhiccelhetnek” (a nagy hőmérsékleten szikrázva eléggő acélra mondják azt a kovácsok, hogy „hiccel”, a kifejezés egy szakzsargon) és az ilyen területeken a felületkikészítés után rendszerint megfigyelhető a bemutatott mintázati hiba.

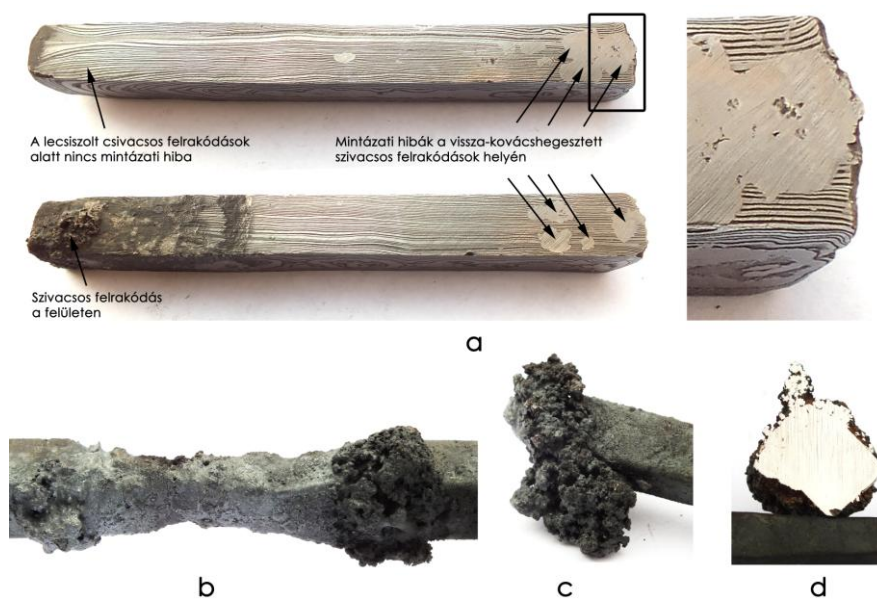
De a hiba kialakulásának alaposabb magyarázatához és az elkerülése érdekében jobban meg kell érteni az acél kovácstűzbeli elégésének, hiccelésének a metallurgiai hátterét.

Módszerek, eredmények

A damaszkolt anyagokon kialakuló felületi hibák vizsgálata érdekében C15 és 90MnCrV8 acélok felhasználásával 160 rétegből álló damaszkolt próbatestet kovácsoltunk (5 rétegből kiindulva, 3 réteg C15 és 2 réteg 90MnCrV8 felhasználásával, így 5 visszahajtással és kovácshegesztéssel volt elérhető a 160 réteg). A kb. 150mm hosszú, 14mm-es négyzet

keresztmetszetű damaszkolt rúd mindkét végét túlhevítettük, elégettük a kovácstűzben. A tartós hícclés után szivacsos felrakódások alakultak ki a felületen. Ezeket a próbatest egyik végén meghagytuk, a másikon viszont vissza-kovácshegesztettük a felületbe (úgy, ahogyan ez a damaszkolt termékek kovácsolásakor is történik). A próbatest ezután szabad levegőn hűlt le. A felületkikészítés során az átkovácsolt véget mind a négy oldalon, a másik végét viszont csak két oldalán csiszoltuk meg, így a próbatesten jól látható, hogy a lecsiszolt szivacsos felrakódások alatt a maratás után nem jelentkezik a mintázati hiba. Azon a végen viszont, ahol a szivacsos felrakódásokat vissza-kovácshegesztettük, a felületen nagy kiterjedésű mintázati hiba látható a maratás után (2a ábra).

Az acél kovácstűzbeli elégésének tanulmányozására C15 anyagminőségű 10mm-es négyzetacélokat égettünk el, hagytunk tartósan híccleni. A tűzből kivett próbatesteket szabad levegőn hagytuk lehűlni. Elsősorban a próbatestek alsó felületén (a tűztérbe alulról fűjtük a levegőt, ld. később) nagyméretű szivacsos felrakódások alakultak ki (2b,c és d ábra). A 2b ábrán látható közepén elégetett C15-ös próbatesten kétoldali szivacsos felrakódások alakultak ki. A 2c ábra elégetett hegyű C15-ös próbatestén nagyméretű szivacsos felrakódás látható, a 2d ábrán pedig egy ilyen szivacsos felrakódás keresztmetszeti csiszolata C15-ös próbatestből kivágott mintán.



2. ábra. Kovácstűzben elégetett próbatesteken megjelenő hibák.

A damaszkolt próbatest mindkét végéből kivágtunk egy-egy mintát, amelyeken metallográfiai vizsgálatokat végeztünk (3. és 4. ábra). Ezek során jól látható volt, hogy a damaszkolt anyag mintázata a szivacsos felrakódás (3a ábra), és a lencse alakú vissza-kovácshegesztett szivacsos felrakódás helyén (3b ábra) megszűnik, ezek a damaszkolt alapanyaghoz képest homogén, nagy karbontartamú (kb. eutektoidos), területekként mutatkoznak meg, alapvetően perlites szövetszerkezettel, kevés bainittel.

A 3a ábra felső részén a damaszkolt alapanyag megfigyelhető rétegzettsége mellett középen, fehér nyíllal jelölve egy széles dekarbonizálódott sáv is látható (több ferrittel a szövetszerkezetben), amelynek a karbontartalma a legutolsó kovácshegesztés után eltelt kevés idő alatt nem tudott még karbondiffúzióval a környezetével kiegyenlítődni. Hasonló dekarbonizálódott réteg figyelhető meg a 4b ábrán is szintén nyíllal jelölve.

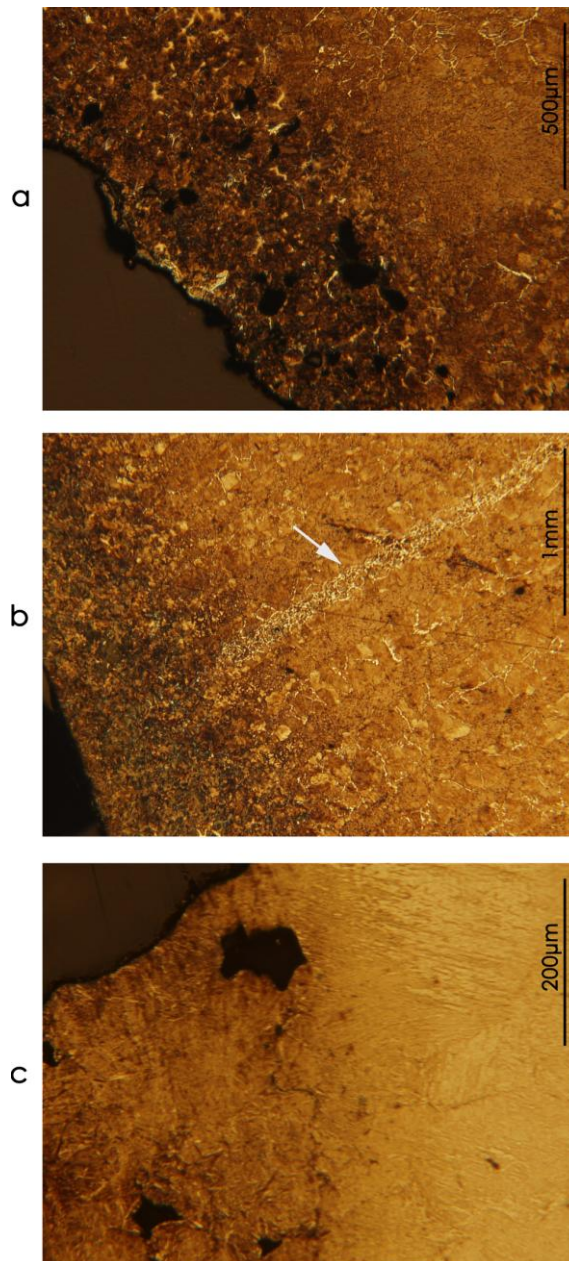
A damaszkolt mintákon megfigyelhető továbbá a C15 és 90MnCrV8 rétegek közötti karbondiffúzió miatt bekövetkező karbontartalom kiegyenlítődé (a próbatest a kb. 1 órás kovácsolás közben 1000-1350°C hőmérsékletű volt). Az eredetileg C15 (0,15%-os karbontartalmú, eredetileg kevés perlitet tartalmazó, túlnyomóan ferrites szövetszerkezetű) rétegek szövetszerkezete főként perlit, kevés, vékonyhálós megjelenésű proeutektoidos ferrittel (4a és b ábra). Ez a szövetszerkezet kb. 0,5%-os karbontartalomnak felel meg. A 4a ábrán a damaszkolt alapanyag három rétege is látható a mikroszkópi kép jobb oldalán, a rétegek karbontartalmában csak kis különbség mutatkozik.

Metallográfiai vizsgálat céljából néhány C15-ös próbatestből szintén keresztmetszeti mintákat vágunk ki (egy reprezentatív mintát mutat be a 3c ábra). Ezek alapján elmondható, hogy a kis karbontartalmú alapanyaghoz képest a szivacsos felrakódások jelentősen felszenültek, karbontartalmuk nagyjából eutektoidos, szövetszerkezetük homogén, főleg perlites (4c ábra).



3. ábra.

Kovácsütüzben elégetett két damaszkolt és egy C15-ös próbatestből kivágott keresztmetszeti minták mikroszkópi képei.



4. ábra. Szivacsos felrakódások két damaszkolt és egy C15-ös próbatesten.

A 2b ábrán látható próbatest kialakulásához vezető kísérletről a Youtube-ra feltöltöttem két videót. Az első 3 percben végig bemutatja a kísérletet: <https://youtu.be/sTaFsA93ZBc>. A második pedig az előbbi videó leglényegesebb szakaszának kinagyított és lelassított változata: <https://youtu.be/WGvC8uxPCow>.

Diszkusszió – a hícclés metallurgiai magyarázata

A leírt jelenség keletkezésének okával kapcsolatban releváns irodalmi adatokat nem találtunk. A hiba kialakulásának körülményei a kovácsolás jellegéből kifolyólag meglehetősen bonyolultak és egzakt mérésekkel nehezen követhetők. Mi a metallurgiai ismereteink felhasználásával kísérletet tettünk a jelenség leírására és magyarázatára. A következőkben

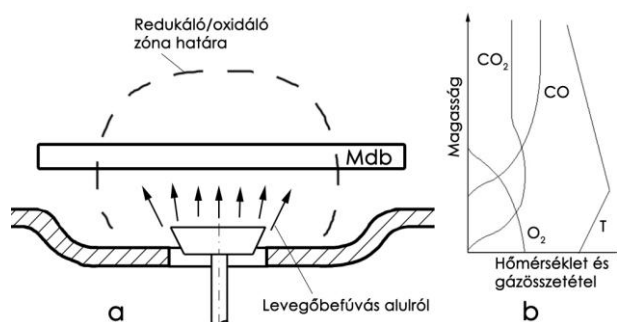
összefoglaljuk az általunk kidolgozott modell lényegét. A modell helyessége a rendelkezésünkre álló kísérleti és vizsgálati lehetőségekkel nem bizonyítható, de mellette szól, hogy logikus magyarázatot ad a bemutatott problémára.

A kísérleti eredmények értelmezésekor, az acél kovácstűzbeli elégetésére, hícclésére és a munkadarab felületén megfigyelhető szivacsos területek kialakulására adandó metallurgiai magyarázatot három fő kérdés köré építjük fel:

- 1) Az acél hícclésekor megolvad-e az acélfázis vagy csak a vas-oxidfázis válik folyékonnyá?
- 2) Mi a magyarázata az acél hícclésekor a munkadarab látványos szikrázásnak?
- 3) A szivacsos részeknek miért lesz nagyobb a karbontartalma (kb. eutektoidos) a munkadarab kiinduló karbontartalmához képest?

A damaszkolt anyagok esetén továbbá kérdés, hogy miért lesz homogén a kialakuló szivacsos felrakódás vissza-kovácshegesztésével létrejött felületi hiba szövetszerkezete és a felületkikészítés során miért nem maradik az ilyen terület?

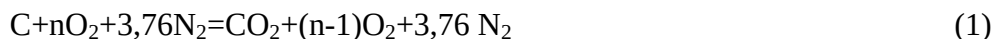
A munkadarab felhevítendő részét a hevítési idő csökkentése érdekében általában a kovácstűz legmelegebb zónájába helyezzük. A kokszt a munkadarabot körbeveszi a kovácstűzben, alatta (a munkadarab és a befúvónyílás között) is néhány cm-nyi izzó koksztérteg van (5a ábra). A kovácstűz legmelegebb zónájában oxidáló az atmoszféra (5b ábra). Ez azonban csak egy kis kiterjedésű zóna, amelynek mérete a befűjt levegő térfogatáramával változik. A levegőbefúvástól távolodva az oxidáló atmoszféra semlegesre majd redukálóra vált. Egy hosszú munkadarab esetén tehát lesznek a munkadarabnak olyan részei, amelyek oxidáló, semleges és redukáló atmoszférán hevülnek. Ugyanez a helyzet, ha a kovácstűzbe oldalról fűjjük be a levegőt (vö. oldalszeles kovácstűz).



5. ábra. Kísérleti elrendezés. a) A munkadarab elhelyezkedése a kovácstűzben középen elégetett próbatest esetén (vö. 4.a ábra), b) a hőmérséklet és a gázösszetétel változása a tűztérben.

A kovácstűz kémiai alkotóit a C égéstermékei (CO , CO_2) és az égési levegő maradékanyagai (O_2 és N_2) teszik ki. Korlátozott mértékben megtalálható az alkotók között a tüzelőanyag nedvességtartalma is vízgőz formában, illetve a kovácszén vagy a faszén esetén maradék lepárlási anyagok is (CO , CO_2 , H_2 ; H_2O CH_4) melyek egy része részt vesz az égési reakciókban. A füstgázok speciális alkotója az SO_2 , amely a tüzelőanyagban levő

kénvegyületek égéséből keletkezik. A levegőbefűvésnél található a legnagyobb oxigénkoncentráció, amelynek hatására a szilárd szén CO₂-vé ég el (1):



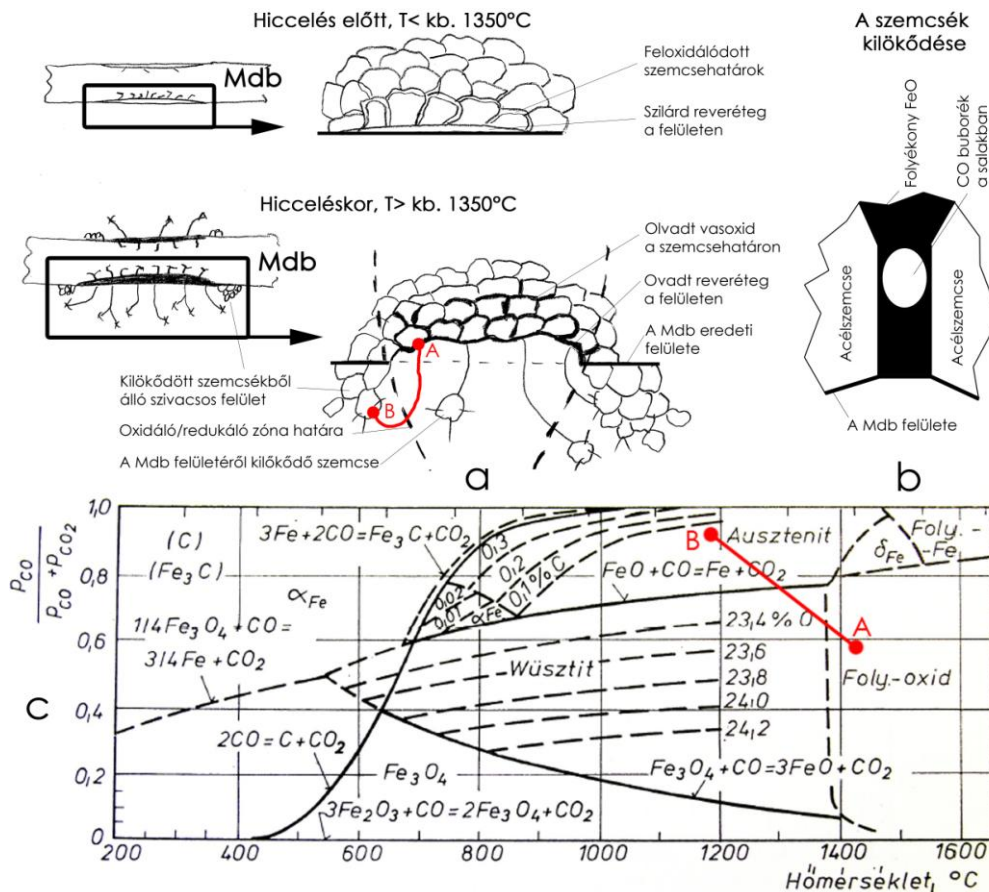
A reakció exoterm jellegéből következően a levegő áramlási irányába esően a munkahőmérséklet megnő, maga az égési levegő fel nem használt része előmelegszik. A két tényezőtől fakadóan az égés sebessége is megnő. A folyamat előrehaladásával a gázok O₂-tartalma egyre fogy és a zérus oxigéntartalom környékén az égés sztöchiometrikussá válik. Hozzávetőleg ebben az állapotban éri el a rendszer a CO₂-tartalom (és egyben az égéshőmérséklet) maximumát, ahol a gázok elvileg már zérus O₂-tartalmat és még zérus CO-tartalmat mutatnak (vö. 5b ábra).

Az égés további fázisában a CO₂-N₂ gázelegy a nyomás és a felhajtóerő hatására továbbra is felfelé áramlik és a CO₂-tartalom reakcióba lép az izzó szénnel a közismert Boudouard-reakció (2) szerint:



A reakció endoterm, melynek hatására munkatér hőmérséklete csökken, egyúttal a CO-tartalma növekedni kezd. Ezzel kialakul a kovácstűzhely felső részében egy CO₂–CO-tartalmú gázelegy, melynek összetétele a hőmérséklettől és a szilárd tüzelőanyag reakcióképességétől függ. A továbbiakban a nagy hőmérsékleten kialakuló, túlnyomórész CO-t tartalmazó gázelegy 1000 °C alá hűl és a Boudouard-reakció megfordulásával a CO-tartalom csökken (vö. a Boudouard-görbe a 6c ábrán).

A kovácstűz legmelegebb (a N₂ mellett túlnyomórészt CO₂-ot tartalmazó), oxidáló atmoszférájú zónájában történhet meg a munkadarab eléégése (6. ábra). A revéképződés kezdeti hőmérséklete 600°C-ra becsülhető (az atmoszféra oxigéntartalmától függően). A reve főként wüsztitből (FeO) és kevés magnetitből (Fe₃O₄) áll, amelynek mennyisége a hőmérséklet emelkedésével tovább csökken. Kb. 1350°C-os hőmérséklet alatt (6a ábra felső része) a felületet még szilárd halmazállapotú reveréteg borítja (a wüsztit olvadáspontja 1377°C). A munkadarab kis mélységben a szemcsehatárok mentén már ekkor feloxidálódik [7, 8].



6. ábra. A munkadarab kovácstűzbeli elégésének és hiccelésének metallurgiai magyarázata

Kb. 1350°C -os hőmérséklet felett a felületet borító és a szemcsehatárokon lévő vas-oxid megolvad (6a ábra alsó része), és úgy véljük, hogy az ekkor megjelenő folyékony vas-oxid-fázis ugrásszerűen megnöveli az acélfázis oxidációjának a sebességét. Ekkor következik be a munkadarab elégése, szikrázása, amit a kovácsok hiccelésnek neveznek. A bemutatott kísérletek és anyagvizsgálatok alapján úgy véljük, a hiccelés magyarázata, hogy egyrészt az olvadt vas-oxid szemcsehatárokon való megjelenésével a szemcsék közötti kohéziós kapcsolat gyengül vagy megszűnik, és egy folyékony vas-oxidból és szilárd acélszemcsékből álló kétfázisú tixomolding keletkezik. Másrészt pedig a gyorsan eloxidálódó szilárd acélfázis karbon tartalma a folyékony vas-oxiddal reagálva heves CO gázképződés mellett ég ki az acélból, és a gáztenziója szilárd acélszemcséket és dugóként viselkedő folyékony revét lök ki a munkadarab felületéről. Maga a kis vagy közepes karbon tartalmú acélfázis a hiccelés során nem olvad meg (1350°C -on legalább 1,2 %-os karbon tartalom szükséges az olvadt fémfázis megjelenéséhez, és a jelenségében nagy szerepet játszik, hogy a fémfázis olvadáspontja nagyobb, mint az oxidjáé.

A hiccelés során a szilárd fémfázis karbon tartalmának elégésekor keletkező CO-ra jellemző egy adott egyensúlyi állandóhoz, azaz hőmérsékletéhez köthető parciális nyomás, p_{CO} . A CO nyomását és a CO-képződés sebességét az ausztentiben diffundáló C sebessége határozza meg. Az izobár dekarbonizáció következményeként keletkező CO egyéb hatásai nem szembetűnőek, mivel a melegalakítás iparban elterjedt $1000\text{--}1200^\circ\text{C}$ -os hőmérsékletén a CO a

pórusokat kitöltő szilárd, de porózus révén keresztül kidiffundál, így gázdinamikai jelenségek nem érzékelhetők. Ezek a viszonyok a réve megolvadásával azonban megváltoznak. Feltételezzük, hogy a korábban feloxidálódott, olvadt révével teli szemcsehatár pórusként viselkedik, és a pórusokban elhelyezkedő olvadt vas-oxid jól záró dugóként zárja el a kidiffundáló CO útját (6b ábra), melynek belsejében a hőmérséklet növekedésével egyre nő a CO parciális nyomása. A CO távozását a kiegyenlítetlen nyomásviszonyok akadályozzák. A CO távozásának feltétele az, hogy a képződő CO nyomása (p_{CO}) legyőzze a külső (p_0 , atmoszférikus) és a kapilláris nyomás (p_{kap}) összegét (3):

$$p_{CO} > p_0 + p_{kap} \quad (3)$$

Az (3) egyenletben foglalt feltétel teljesülésekor a CO robbanásszerűen távozik a kapillárisból, olvadt salakot és szilárd acélszemcséket kilövellve, ez jelentkezik a hicceléskor szikraeső képében. A szikrák mennyisége, nagysága és tömegárama úgy véljük, a C-tartalommal és a hőmérséklettel nő.

A kirepülő szemcsék egy része az oxidáló atmoszférában teljesen wüszttté ég el, más része kijutva onnan, redukáló atmoszférán felszenül. A 6a ábra alsó részén látható egy kitüntetett szemcse, amely a nagy hőmérsékletű, oxidáló atmoszférájú (vö. Fe-C-O rendszer, 6c ábra) „A” pontból indul, majd az oxidáló zónából kijutva a kisebb hőmérsékletű, már redukáló atmoszférájú „B” pontba érkezve hozzáheged a már ott lévő, szivacsos felrakódást alkotó többi szemcséhez. A munkadarab oxidáló atmoszférán eléggő anyagából kilökődő acélszemcsék tehát a munkadarab semleges, enyhén redukáló atmoszférán lévő részén összegyűlnek, összehegednek (diffúziós hegedés), így alakulnak ki a munkadarab felületén a hiccelés után megfigyelhető szivacsos felrakódások (a munkadarab oxidáló atmoszférán eléggő anyagából keletkező folyékony vas-oxid feltételezhetően szintén kijuthat a tűztér redukáló zónájába és visszaredukálódhat színvassá). Ennek a nagy fajlagos felületű szivacsos fémfázisnak a karbontartalma egyensúlyt tart a gázatmoszféra adott területre jellemző karbonpotenciáljával, így az alapanyag eredetileg alacsony karbontartalma esetén is képes erősen felszenülni (ld. a C15-ös próbatest felszenült szivacsos felrakódásait a 3c ábrán). A felszenülés feltételezhetően már a szemcse röptében, amikor az a redukáló zónába ér, részben megtörténik, a szemcse nagy fajlagos felülete és a nagy hőmérséklet miatti gyors karbondiffúzió következtében.

Úgy gondoljuk, hogy a damaszkolt anyagok esetén azért lesz homogén és nehezen maródó a kialakuló szivacsos felrakódás vissza-kovácshegesztésével létrejött felületi hiba, mert nem tartalmaz a karbonon kívül más ötvözőt, a karbon eloszlása pedig egyenletes benne (ld. a 3. és 4. ábrán bemutatott csiszolatok). Bár a szivacsos felrakódás fémfázisa részben az ötvözött 90MnCrV8-ből származik, a Mn, a Cr és a V nagyobb oxigénhez való affinitásuk miatt a 90MnCrV8 szemcsékből még a szén megelőzve kiégnek (az ötvözők hiányát később még SEM-EDS ill. GDOES mérésekkel próbáljuk meg igazolni). Az ötvözőket nem tartalmazó egyszerű szénacélnak tekinthető lencse alakú vissza-kovácshegesztett mintázati hibák tehát az ötvözőket nem tartalmazó C15-höz vagy C45-höz hasonlóan világos területként jelentkeznek a felületkikészítés után.

A munkadarabnak a tűztér oxidáló zónájában égő anyagában és a szivacsos felrakódásban a szemcsehatárokat körülvevő olvadt vasoxidban úszó acélszemcsék kétfázisú, tixomolding-

jellegű anyagot alkotnak, amely egyszerűen a súlyánál fogva lefolyhat a munkadarab alsó részére (egy ilyen tixomolding csepp lecsöppenése megfigyelhető a korábban hivatkozott második videón is) és a munkadarabtól elválva egy salakos-szivacsos vasrög gyűlhet össze a tűztér alján vagy szélén, ahol az atmoszférától függően elég vagy felszenül. Az ilyen égő vasrögök még sokáig szórják a kovácstűzben a szikrát egy elhiccelt munkadarab eltávolítása után is. Az el nem égő vasrögök viszont egy nagyobb, szivacsos, vasbucaszerű rögge állhatnak össze (a japán vasművességben ezt „kerának” nevezik).

Összefoglalás

Az acél kovácstűzbeli elégésének, hiccélésének metallurgiai magyarázatára elméleti modellt dolgozunk ki. Ennek alapján legfontosabb következtetéseink az alábbiak:

- 1) A kis és közepes karbontartalmú acélfázis a hiccéléskor nem olvad meg.
- 2) A hiccélés közben megfigyelhető látványos szikrázás feltételezett magyarázata, hogy a szemcsehatárokon megjelent reve a nagy hőmérsékleten (kb. 1350°C felett) megolvad, és a szemcsehatárok között egy folyékony salakdugót képez, amely elzárja az acélfázis karbontartalmának és az olvadt revét alkotó folyékony wüstitnek a reakciójából keletkező CO útját. Amikor a képződő CO nyomása legyőzi a külső és a kapilláris nyomás összegét, a CO robbanásszerűen távozik a kapillárisból, olvadt salakot és szilárd acélszemcséket kilövellve. Ez jelentkezik szikra képében.
- 3) Mivel az acél munkadarab égése csak a tűztér kis kiterjedésű, oxidáló zónájában megy végbe a hiccélés során az innen kirepülő szemcsék egy része kijutva onnan, a munkadarab redukáló atmoszférán hevülő felületéhez heged, ahol a kialakuló nagy fajlagos felületű szivacsos fémfázis karbontartalma egyensúlyba kerül a gázatmoszféra adott területre jellemző karbonpotenciáljával, és bekövetkezik a felszenülése.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton is szeretnénk megköszönni a Gépészmérnök Képzésért alapítványnak a kutatáshoz nyújtott eszköztámogatását.

Irodalom

- [1] Jones, L.A. 2002. Blade Construction and Pattern-Welding, [in:] I. Peirce, Swords of the Viking Age, Woodbridge: The Boydell Press, pp. 145–151.
- [2] Tylecote, R.F.; Gilmour, B.J.J. 1986. The Metallography of Early Ferrous Edge Tools and Edged Weapons, BAR British Series 155, Ox-ford: B.A.R., pp. 146–262, 251–252.
- [3] Böhne, C.; Dannheimer, H. 1961. Studien an Wurmbuntklingen des frühen Mittelalters, Bayerische Vorgeschichtsblätter 26, pp. 107–122.

- [4] *Jones, L.A.* 1997. The Serpent in the Sword: Pattern-Welding in Early Medieval Swords, „Park Lane Arms Fair Catalogue” 4, pp. 7–11, online változat <<http://www.vikingsword.com/serpent.pdf>>
- [5] *Hošek, J.* 2011. Serrated welds in medieval knives from territory of the Czech Republic and elsewhere, előadás, Stará hut' u Adamova, Iron Smelting and Processing Days.
- [6] *Thiele, Á. – Hošek, J. – Kucypera, P. – Dévényi, L.* 2015: The Role of Pattern-Welding in Historical Swords –Mechanical Testing of Materials Used in Their Manufacture. *Archaeometry* 57/4, 720–739.
- [7] *Wolf M. M.:* Scale Formation and Descaling in Continuous Casting and Hot Rolling. Part II. Ironmaking and Steelmaking. February 2000. p. 66
- [8] *Birosca S., West G. D. and Higginson R. L.:* Microstructural investigation of the oxide scale on low carbon steel METAL 2005 24.- 26.5.2005