

Damaszkolt pengeanyagok mechanikai tulajdonságai

1. Bevezetés

Immár 25 éve kovácsolok, az elmúlt 10 évben különösen intenzíven, majdnem napi rendszerességgel, heti átlagosan kb. 25 órát. Többféle baltát, fokost és kést készítek. A termékeimhez három különböző anyagminőségű acélt használok fel:

- S235 – kis széntartalmú lágyacél, kb. C15-nek felel meg
- C45 – közepes széntartalmú legegyszerűbb szerszámacél
- 90MnCrV8 – eutektoidos, mangánnal ötvözött hidegalakító szerszámacél (régí M1-es jelű)

Az 1. táblázatban bemutatom ezeknek az anyagoknak a vonatkozó szabványok szerinti kémiai összetételét:

Anyagminőség	1. Táblázat: A C15, a C45 és az M1 kémiai összetétele				
	Kémiai összetétel (tömegszázalék)				
	C	Si	Mn	Cr	V
C15	max 0,2	max 0,55	max 1,4	max 0,3	-
C45	0,42-0,5	max 0,4	0,5-0,8	max 0,4	-
M1	0,85-0,95	0,1-0,4	1,8-2,2	0,2-0,5	0,05-0,2

Ezeknek az alapanyagoknak a kombinációjával különböző mintázatú damaszkolt anyagokat is készítek. Kisebb igénybevételre szánt damaszkolt anyagokat C15 és M1 anyagpárosítással:

- C15+M1 cs40 – csavart mintás, 40 rétegű anyag. Fokosok vágóéléhez és egyéb damaszkolt termékeimhez (pl. sörnyítő, dugóhúzó, kulcstartó, stb.) használom. Könnyen kovácsolható (az átlagosan kisebb, kb. C45-nek megfelelő széntartalom miatt), rétegszétválásra kevésbé hajlamos mintázat (ez igaz minden csavart mintára), nagy alakításokat is elvisel. Az egyéb termékeimnél ez a kisebb rétegszám miatt szebb megjelenésű, mint ugyanennek a 80 rétegű változata.
- C15+M1 cs80 – csavart mintás, 80 rétegű anyag. Kisebb igénybevételű késpengékhez, pl. nyakkésekhez használom. A pengén szebben mutat ez a mintázat, mint az előző, 40 rétegű változat. Hőkezelésnél a csavarodás irányával ellentétesen kismértékű edzési vetemedés szokott jelentkezni (megegyezés után egyengethető).
- C15+M1 160 – párhuzamos mintás, 160 rétegű anyag. Teljesen damaszkolt fokos és baltafejekhez használom. Könnyen kovácsolható, de rétegszétválásra hajlamos mintázat, a száliránynak nem megfelelő nagy alakításokat nem jól viseli.

Nagyobb igénybevételre szánt damaszkolt anyagokat C45 és M1 anyagpárosítással:

- C45+M1 cs40 – csavart mintás, 40 rétegű anyag. Balták vágóéléhez használom. Ez a kisebb rétegszám miatt jobban mutat a végőlelén mint a 80 rétegű változata.
- C45+M1 cs80 - csavart mintás, 80 rétegű anyag. Késpengékhez használom. Ugyanaz igaz rá, mint a C15+M1-es változatára, de az átlagosan nagyobb széntartalom miatt nehezebben kovácsolható.
- C45+M1 160 - párhuzamos mintás, 160 rétegű anyag. Késpengékhez, néha nagy igénybevételű baltákhoz használom.
- C45+M1 2xcs40 – duplacsavart mintás, kétszer 40 rétegű anyag. Késpengékhez használom, nagyon mutatós madártollszerű mintázat. A két csavart réteg határán rétegszétválásra hajlamos. Edzési vetemedés (csavarodás formájában legalábbis) ennél a mintázatnál nem jelentkezik, mert a két csavart mintázat ellentétes menetű (bal és jobb).



[a] - 80 rétegű csavart C45+90MnCrV8



[b] - 2 x 40 rétegű csavart C45+90MnCrV8



[d] - 160 rétegű rózsadamaszk C45+90MnCrV8

1. Ábra: Késpengéknél használt damaszkolt anyagok mintázata

A felsorolt damaszkolt anyagok közül néhány, késpengéknél használt mintázatot az 1. ábrán mutatok be.

Az elkészült termékeknél, késeknél, baltáknál stb. nyilvánvalóan nagyon fontosak azok mechanikai tulajdonságai, ezek ugyanis nem dísz tárgynak, hanem használati eszköznek készülnek (még a damaszkoltak is). A mechanikai tulajdonságokat alapvetően három fő tényező határozza meg:

- Geometria – pl. élszög, pengevastagság
- Anyagminőség – az acél kémiai összetétele
- Hőkezelés

Ezek közül a geometriát szoktam a legkevésbé variálni, a másik kettő legjobb beállításaival viszont sokat kísérleteztem az elmúlt években. Mivel a termékeim jó részét magam is használom, a termelésben használt szerszámaimat magamnak készítem (pl. balták, kések, vésők, vonókés, stb.) és a vásárlóktól is kapok visszajelzéseket, felhasználói oldalról is sok tapasztalat gyűlt össze. Mostanára különösebb anyagvizsgálatok, mérések nélkül, tapasztalatból is rájöttem, hogy a különböző termékeimnél milyen anyagokat (damaszkolt esetben milyen anyagpárosításokat) és milyen hőkezelést célszerű választani a legjobb mechanikai tulajdonságok elérése érdekében (bár néha nem csak ez számít, hanem pl. a könnyebb kovácsolhatóság is, pl. ezért van az, hogy C15+M1, nem pedig C45+M1 kombinációval készítem a kisebb igénybevételre szánt damaszkolt fokosfejeket). Tudni szerettem volna viszont azt, hogy egyrészt tényleg helyesek-e a tapasztalati úton kikísérletezett anyagminőség-hőkezelés párosítások, illetve hogy ezek pontosan milyen mérőszámokkal (pl. HRc keménység, határhajlíthatósági szög, stb.) jellemezhető mechanikai tulajdonságokat eredményeznek. A következőkben részletesen bemutatom egy erre irányuló nemrég lezárt anyagvizsgálati kutatásom módszereit és eredményeit.

2. A próbatestek elkészítése

2.1. Bevezetés

A próbatestek elkészítéséhez először azt kellett végiggondolni, hogy milyen geometriájú próbatesteken milyen mechanikai anyagvizsgálatokat szeretnénk elvégezni majd. Mivel a legnagyobb igénybevételnek a kés és baltapengék vannak kitéve, úgy döntöttem, hogy az anyagvizsgálatokat penge alakú próbatesteken végzem el. A próbatestek tehát „V” keresztmetszetűek kb. 18mm szélesek és 2mm vastagok lettek. A próbatestek hossza 60mm volt ebből 2mm-es szakaszon kifent élszalaggal (ld. a 2. ábrát). A késpengéim általában némileg nagyobb keresztmetszetűek ennél, a szélességük jellemzően 20-32mm közötti, vastagságuk pedig 2,5-4mm-es, de a próbatestek ilyen méretmegválasztása mellett lehetett a legegyszerűbben elvégezni a mechanikai anyagvizsgálatokat.

Ezek közül ugyanis a leglényegesebb a hajlítóvizsgálat volt, amelynek során a satuba fogott próbatesteket egy franciakulcs 1m-esre meghosszabbított szárát egy konyhamérleggel tolva hajlítottam és törtem el, így a szívósságra és az alakíthatóságra jellemző mérőszámokat határozhattam meg. A rendelkezésre álló konyhamérleg méréshatára 5kg volt, a legszívósabb próbatestek pedig maximum 4kg-nál törtek el. Ha nagyobb lett volna a próbatestek keresztmetszete, akkor ez az 5kg-os méréshatár nem lett volna elegendő, vagy az erőkart kellett volna előnytelenül hosszúra növelni (ezt a most röviden felvázolt hajlítóvizsgálatot később részleteiben, képekkel illusztrálva is bemutatom). A hajlítóvizsgálat jól modellezi a pengéknek a nagy oldalerők vagy nyomaték okozta igénybevételét.

A másik mechanikai anyagvizsgálat szintén egy lényeges jellemzőt volt hivatott meghatározni, mégpedig a penge éltartósságát. Ennek során kilágyított szeget vágtam el a penge egy felélezett szakaszával és a csorbulás mértékét figyeltem.

Végül a harmadik mechanikai anyagvizsgálat egyszerű, közismert HRc keménységmérés volt.

A mechanikai anyagvizsgálatok után néhány kiválasztott próbatesten metallográfiai vizsgálatok következtek, azért hogy a kapott mérőszámokat még jobban értelmezni lehessen.

A C15, C45 és M1 alapanyagokon kívül 40 rétegű csavart mintás és 160 rétegű párhuzamos mintás C15+M1 és C45+M1 anyagpárosítású damaszkolt próbatesteket készítettem



2. Ábra: Pengeszerű próbatestek „V” keresztmetszettel egy szakaszon leélezve vágáspróba után

2.2. Kovácsolás

A damaszkolt próbatesteket (a szokásos módon) 5 réteg 30x10mm-es keresztmetszetű laposacélokból készítettem el. A laposacélok hossza 50mm volt, 2 M1-es réteget fogott közre 3 C15 vagy C45-ös réteg. A végükön össze voltak hegesztve és az egyik oldalon szarát hegesztettem az előgyártmányhoz (ld. 3. ábra). Az M1-es acélok homokszórtak (és egyébként lágyított hőkezeltségi állapotúak) voltak, a C45-ösök pedig hidegen húzottak (és normalizáltak). Ezeknek a felülete tehát fémtisztának tekinthető. A C15-ös acélok viszont melegen hengereltek voltak (szintén normalizáltak), így felületüket vékony reveréteg borította, amit a jobb kovácshegeszthetőség miatt még az előgyártmány összeállítása előtt sarokcsiszolóval, tisztítókoronggal lekészörültem.

Ezután a hegesztett előgyártmányból háromszor megismételt kovácshegesztés, nyújtás, félbevágás és visszahajtás lépésekkel 40 rétegű damaszkolt tömböt kovácsoltam (ld. 4. ábra). A hevítés, kovácsolás, kovácshegesztések és a többi technológiai lépés is a szokásos módon történt: hevítés centrifugálventillátor (klasszikus régi öntvényházas „kovácsventillátor”) szította alulról fűjt koksztűzben, kovácsolás ajax2-es rugóskalapáccsal, kovácshegesztés előtt a hegesztendő felület drótkorongos revétlenítése majd bóraxszal való beszórása, ezt követően pedig a felületek szoros zárása, utólagos szétnyílás ellen pontszerű hegesztéssel biztosítva, kovácshegesztés a gyulladási hőmérséklet elérésekor, enyhén hiccélő munkadarabnál. A kb. 240x25x15mm-es befoglaló méretű, 40 rétegű damaszkolt tömböt melegen félbevágtam.



3. Ábra: Hegesztett előgyártmány a damaszkolt próbatestekhez. 3db C45-ös réteg fog közre 2db M1-es réteget. Az előgyártmány befoglaló méretei 50x30x10mm.



4. Ábra: 40 rétegű damaszkolt tömb közepén melegen bevágva félbetöréshez



5. Ábra: 12mm-es négyzet keresztmetszetű rúd szakaszos csavarás közben



6. Ábra: A megcsavart rúd lapos keresztmetszetűvé kovácsolása



7. Ábra: „V” keresztmetszetű rúd kovácsolása

Az egyik félből 12mm-es négyzet keresztmetszetű rudat kovácsoltam, amit ezután szakaszosan hevítve megcsavartam (az egyik végét satuba fogva, a másikat egy erre célra készült kétkaros csavarószerszámba fogva csavartam meg), így egy kb. 1,3mm-es menetemelkedésű (négybekezdésű jobbmenet), 15mm átmérőjű csavart rúd jött létre (ld. 5. ábra). Ezt ezután 16x2mm-es keresztmetszetű hosszú, lapos rúddá kovácsoltam (ld. 6. ábra), majd ezt kézi kovácsolással kb. 19mm széles és 2,5mm vastag „V” keresztmetszetűre (ld. 7. ábra). Így történt a 40 rétegű csavart mintás próbatestek kovácsolása.

A 40 rétegű tömb másik feléből a további két hajtással és kovácshegesztéssel 160 rétegű párhuzamos mintás próbatesteket kovácsoltam ki az előbb leírtakhoz hasonlóan.

Az C15, C45 és M1 alapanyagokból szintén kovácsoltam „V” keresztmetszetű rudakat, így összesen 7db ilyen rúd készült (3db az alapanyagokból, 4db damaszkolt)

A „V” keresztmetszetű rudak kovácsolásakor az egyes lépéseknél megmértem a munkarab tömegét. Az egyes lépésekig eltelt időt is mértem, de csak a C15+M1 anyagpárosításnál (a másikinál is nagyon hasonló időeredmények

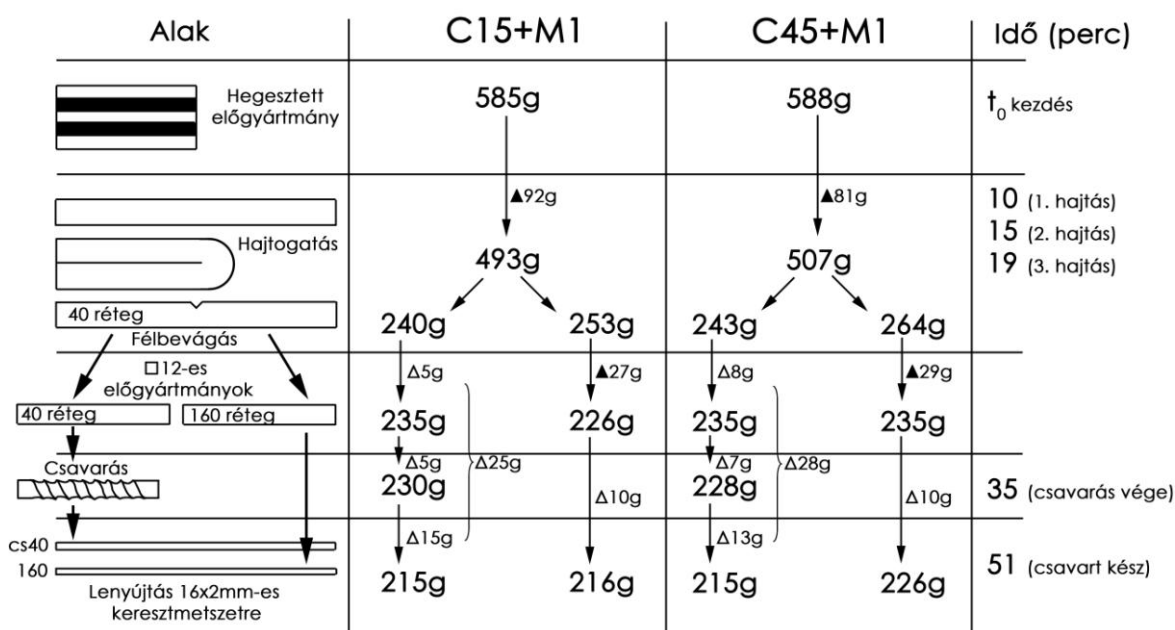
születtek volna, illetve utólag látható az is, hogy a nagy hasonlóság miatt a tömegméréseket is elég lett volna csak az egyik anyagpárosításra elvégezni). Az eredményeket a 8. ábrán mutatom be.

A kiinduló két (C15+M1 és C45+M1) 5 rétegű hegesztett előgyártmányok tömege 585g és 588g volt. A 40 rétegű damaszkolt tömbig való eljutáshoz a kovácshegesztések 10, 15 és 19 percnél történtek, a tömb tömege 493g és 507g volt, tehát 92g és 81g leégési veszteség volt a három kovácshegesztés során. Ezeket 240g, 243g és 253g, 264g tömegű felekre vágtam, amikből a 12mm keresztmetszetű 40 és 160 rétegű négyzetes rudak tömegei 235g, 235g és 226g, 235g lettek. A 160 rétegű párhuzamos mintás rudak a további két kovácshegesztés során további 27g és 29g leégési veszteséget szenvedtek el.

A csavarás után a rudak 230g és 228g-osak lettek, majd a 16x2mm-es keresztmetszetűre kovácsolás után mindkét anyagpárosítás esetén 215g-os tömegűek lettek a rudak. A csavarás 35 percnél fejeződött be, a lapos rudak pedig 51 percnél készültek el. A tiszta kovácsolási lépések során a csavart mintás rudak esetén 25g és 18g volt a leégési veszteség.

A 160 rétegű párhuzamos mintás 16x2mm-es keresztmetszetű lapos rúd 216g és 225g-os lett. A kovácsolás során további 10g és 10g volt a leégési veszteség. Itt időmérések már nem történtek.

A 8. ábrán a leégési veszteségeket Δ jellel jelölöm. A feketével kitöltött Δ jel a kovácshegesztés során történt leégési veszteséget, a kitöltés nélküli pedig a tisztán kovácsolás során történt leégési veszteséget jelöli.



8. Ábra: A „V” keresztmetszetű rudak kovácsolásakor az egyes technológiai lépéseknél a munkadarab tömege és az eltelt idő. Feltüntetve továbbá a leégési veszteségek

2. Táblázat: Leégési veszteségek a próbatestek kovácsolásakor

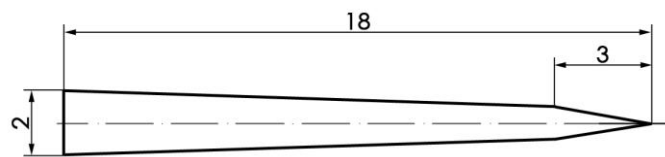
Damaszkolt anyag	Leégési veszteségek					
	Hegesztés		Kovácsolás		Összesen	
	g	%	g	%	g	%
C15+M1 cs40	45	16	25	9	70	25
C15+M1 160	72	24	10	3	82	27
C45+M1 cs40	39	14	28	10	67	24
C45+M1 160	68	22	10	3	78	25

Mivel a leégési veszteségeknek gazdaságossági szempontból nagy jelentősége van, a 2. táblázatban tovább folytatom az erre vonatkozó eredmények kiértékelését. Az eredményekből jól látható, hogy a leégési veszteségek többsége a kovácshegesztésekből adódik. A 160 rétegű lapos rudak esetén 24% és 22% (a számításoknál fajlagos és kerekített értékekkel számoltam), míg a 40 rétegű csavartaknál, amivel azoknál kevesebb kovácshegesztés volt, csak 16% és 14% a hegesztésből adódó leégési veszteség. Ezekhez képest a kovácsolások leégési veszteségei jóval kisebbek, a 160 rétegűeknél mindössze 3% és 3%, illetve a 40 rétegű csavartaknál 9% és 10% (ezeknél több volt a kovácsolás, és bár a csavart rúd laposra kovácsolásakor van egy kis kovácshegesztés, ezt a lépést is kovácsolásnak számítom, ld. a 8. ábra utolsó sorában szereplő $\Delta 15g$ és $\Delta 13g$ -os leégési veszteségek). Az összes leégési veszteség mindegyik esetben 25% körüli. Itt jegyzem meg, hogy a tapasztalataim szerint a százalékos (fajlagos) leégési veszteségek nagyobb méretű hegesztett előgyártmányoknál kisebbek (emiatt szoktam általában 50mm-es hosszúság helyett 80-100mm hosszú hegesztett előgyártmányokból damaszkolni, ez még az ajax2-es rugóskalapáccsal könnyedén átkovácsolható méret).

2.3. Csiszolás, maratás és hőkezelés

A kikovácsolt „V” keresztmetszetű rudak revés felületét sarokcsiszolóval tisztító koronggal (ez a felületet borító nagy keménységű revét könnyebben letisztítja, mint a lamellás korong, ami hajlamos a revés felületen inkább megégni) fémtisztára csiszoltam. A fémtisztára csiszolt felületet ezután P40-es lamellás koronggal csiszoltam tovább. A csiszolásokat követően a „V” keresztmetszetű rudak kb. 18mm szélesek lettek, a fokuk 2mm vastag az élük pedig kb. 1mm vastag volt (késeknél általában ez a méret inkább 3-6 tized mm szokott lenni). A csiszolást bár kézzel végeztem, a méreteken csak pár tized mm-es eltérés volt.

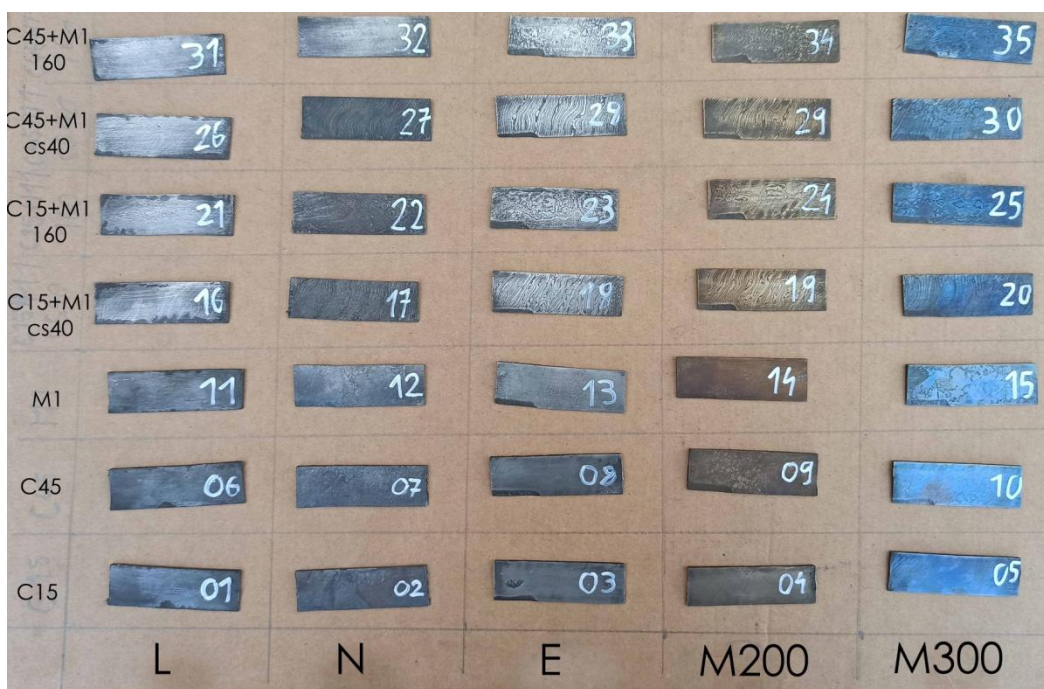
Ezután feldaraboltam a rudakat 60mm hosszú darabokra. Mindegyik rúdból 5-6db próbatest jött ki. A később vágáspróbára szánt próbatestekre szalagcsiszolón kb. 20mm-es hosszban P40-es csiszolópapírral kb. 3mm magasságú, és kb. 20°-os szögű élszalagot csiszoltam (ld. 9. ábra).



9. Ábra: A penge keresztmetszetének méretei

A csiszolások után a próbatestek hőkezelése következett. Mindegyik anyagtípusból ötféle hőkezeléssel készítettem próbatesteket ausztenitesítési hőmérsékletről való szabályozott sebességű hűtéssel majd néhány esetben megeresztéssel:

- Lágyított – hűtés fahamuban (az összesen hét próbatestet a még kisebb, és azonos lehűlési sebesség érdekében szintén izzó vasgyámok között temettem bele egy vödör fahamuba).
- Normalizált – az egyes próbatesteket az üllőn a fokukra felállítva, szabad levegőn hagytam lehűlni
- Edzett – kb. 60°C-os használt sütőolajban egyesével lehűtött próbatestek
- 200°C-on megeresztett – edzés után konyhai kissütőben 30 percig megeresztve (ennyi idő elegendő volt a vékony próbatestek hőkiegyenlítéséhez)
- 300°C-on megeresztett – az előbbihez hasonlóan



10. Ábra: Próbatestek különböző anyagminőségben és hőkezelési állapotban.

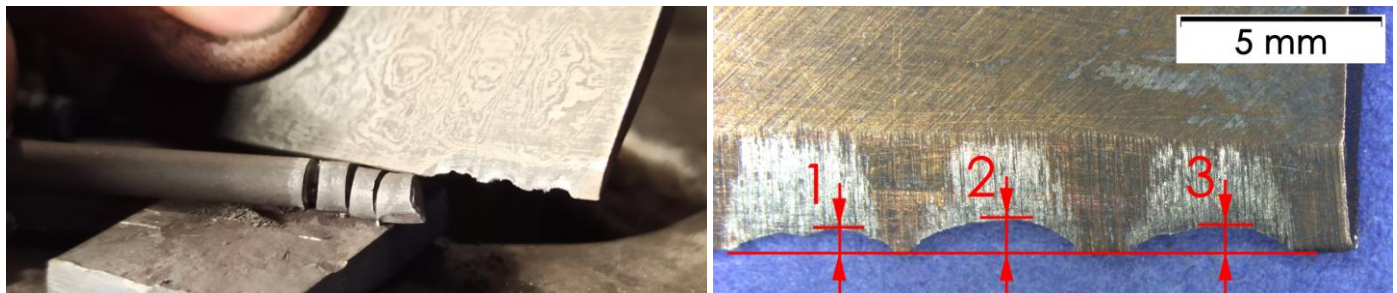
A megeresztésre szánt vagy damaszkolt próbatestek esetén az ismét revés és felületet P100-as csiszolópapírral, kézzel fémtisztára csiszoltam a futtatási színek és/vagy a mintázat későbbi láthatóvá tétele érdekében. Ezután a damaszkolt próbatesteket kb. 70°C-ra melegített akkumulátorsavban (37% kénsavat tartalmazó desztillált víz) kb. 1 percet marattam, így az M1 és a C15 vagy C45 eltérő maródása miatt (az M1 maródik jobban) láthatóvá vált a damaszkolt próbatesteken a mintázat. A maratások után ismét egy kis finom, kézi csiszolás következett P100-as csiszolópapírral. Ezután pedig a megeresztésre szánt próbatestek megeresztése következett a kis konyhai sütőben, ami 320°C-ig tudott melegíteni. A megeresztések után a felületen látható futtatási színek alapján inkább 220°C-os és 310°C-os hőmérsékletű megeresztések történtek. A sorszámokkal is ellátott próbatestek a 10. ábrán láthatók.

3. Mechanikai anyagvizsgálatok

3.1. Vágáspróba

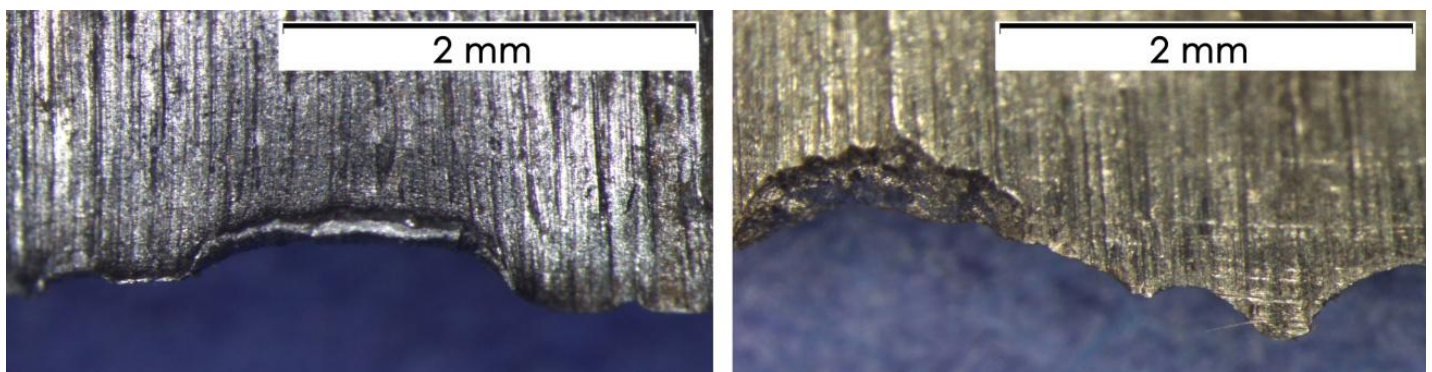
Az első mechanikai anyagvizsgálat, amit a próbatesteken elvégeztem a vágáspróba volt. Ennek során egy kilagyított 100-as szeget (4,2mm átmérőjű, 100mm hosszú) vágtam át teljesen a próbatest felélezetett végével háromszor (ld. 11a ábra). A szeget egy lágyvas lapocskára helyeztem, a próbatest fokát pedig egy 1kg-os kalapáccsal ütöttem. Némi hibát okozhatott az anyagvizsgálat során, ha a próbatest nem volt teljesen függőleges, vagy a kalapáccsal nem sikerült jól eltalálni (az ilyen próbálkozásokat kivettem a későbbi kiértékelésből), de összességében jól összehasonlítható mérések történtek. A vágáspróbákat ugyanazon a szegen végeztem el.

A vágáspróbák után az egyes próbatestek csorbult élszakaszát sztereo mikroszkóp alatt néztem meg és a csorbulások maximális mélységeinek átlagát határoztam meg mikrométerben, ahogyan a 11b ábra mutatja (itt lehetett volna ennél sokkal szofisztikáltabb kiértékelést is végezni, de azért lássuk be, ez nem egy élvonalbeli tudományos kutatás). Az éltartosságra tehát így a mikrométerben mért csorbulást vezetem be, mint jellemző mérőszámot, ami tulajdonképpen egyfajta szilárdsági jellemző. Az eredményeket ld. később.



11. ábra: Vágáspróba (a) és kiértékelése (b)

Az eredmények kiértékelhetőségét javítandó azt is megfigyeltem, hogy a csorbulás során az élszalag kihajlik (h), vagy inkább kipereg (p). A kihajlás során az élszalag képlékeny alakváltozás során felgyűrődik. Ha a csorbulás olyan kismértékű volt, hogy ezt szabad szemmel nem lehetett egyértelműen eldönteni, vagy mindkettő csorbulási forma jelentkezett, de csak kis mértékben, akkor megmarad (m) jelölést kapott. Egy kihajlással és egy kipergéssel csorbult élszalagot hasonlít össze a 12. ábra (#9 és #13).



12. ábra: Egy kihajlással (a) és egy kipergéssel csorbult élszalag (b)

3.2. Hajlítóvizsgálat

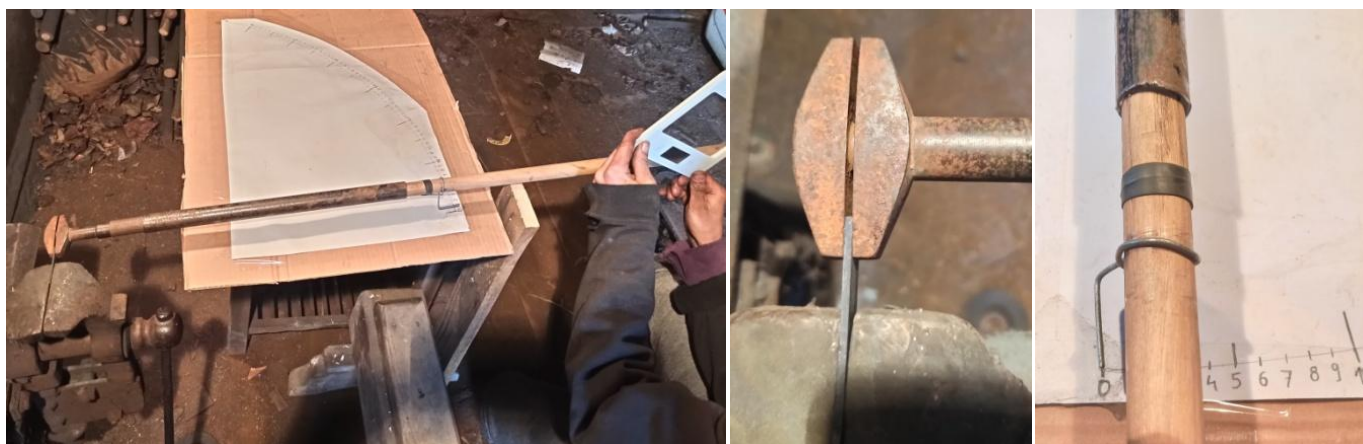
A vágáspróbák után következtek a hajlítóvizsgálatok. A 60mm hosszú próbatesteket satuba fogva egy hosszú karú franciukulccsal hajlítottam meg (ld. 13. ábra). A próbatest kinyúló szakasza kb. 20mm volt, a franciukulccsal pedig kb. 10mm-es szakaszon fogtam meg. A franciukulcs szárán, a befogástól 60cm-es távolságra egy mutatót helyeztem el, amely egy skálázott körív fölött mozgott, így mérhető volt a szögelfordulás. Az elrendezésből adódóan 60°-ig volt lehetséges szögelfordulást mérni. A franciukulcs hosszú karját a befogástól 100cm-es távolságra egy konyhamérleggel toltam, amelynek méréshatára 5kg volt.

Azokon a próbatesteken, amelyek a hajlítóvizsgálat során eltörtek még egy mérést el lehetett végezni (arra azonban ügyeltem, hogy ne a leélezett szakaszon történjen a hajlítás, ez a satuba fogva maradjon), ilyenkor átlagoltam.

A mérés során felírtam a próbatest töréséhez tartozó nyomaték (a 100cm hosszú karon ható súlyerőből számítva) és szöghelyzet értékpárokat (továbbá 10 fokonként felírtam az összetartozó nyomaték-szöghelyzet értékpárokat is, így a mérések után ezekből a pontokból hajlítódiaagram is rajzolható lett volna, ezt azonban utólag ismét túlzásnak ítéltam meg).

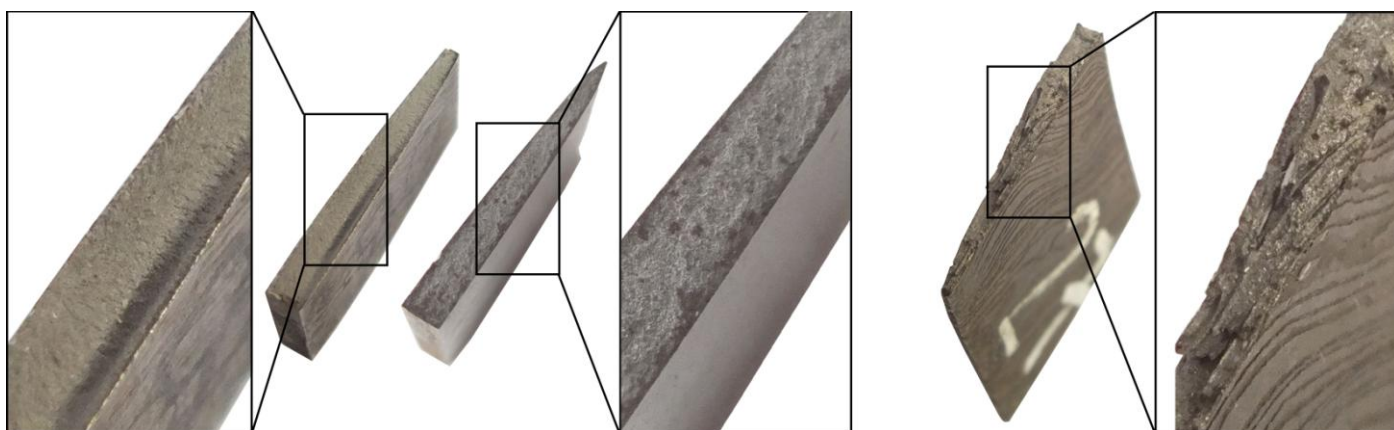
A próbatestek (főleg a damaszkoltak) jellemzően nem teljes keresztmetszetükben törtek el, hanem a húzott oldalon egy repedés jelent meg rajtuk. A mérést tehát a repedés megjelenéséig végeztem, amit jól hallható csattanás jelzett.

Azokat a lágy próbatesteket, amiket 60° -nál tovább lehetett meghajlítani, a 60° -hoz tartozó hajlítónyomatékkal jellemeztem. A töréshez tartozó nyomaték tulajdonképpen a próbatest szívósságával összefüggő mérőszám, míg a töréshez tartozó szöghelyzet az alakíthatóságával. Az eredményeket ld. később.



13. Ábra: A hajlítóvizsgálat elrendezése (a), a próbatest befogása satuba és franciakulccsal (b), a hajlítókár mutatója a skálázott körív felett (c)

Az alapanyagok és a damaszkolt anyagok töretfelületet jelentősen különbözött egymástól. Anyagtól és hőkezeltégi állapottól függően mindkettőnél megfigyelhető volt szívós, matt kagylós felületet mutató töret (amikor a repedés a szemcsék belsejében terjed) és rideg, csillogó, a szemcsehatárokat kirajzoló töret (amikor a repedés a szemcsék határán terjed). Az alapanyagok esetében homogén töret volt látható, a damaszkolt anyagoknál viszont minden esetben többé-kevésbé kirajzolódtak a kemény és lágy rétegek a töretfelületen is. A 14. ábrán az olajedzett C45 (#8) szívós és 300° -on megeresztett M1 (#13) rideg töretét, illetve a normalizált C45+M1 cs40 (#27) próbatest töretfelületeit hasonlítom össze példaképpen.



14. Ábra: Olajedzett C45 (#8, balra) és (#13, középen), illetve normalizált C45+M1 cs40 (#27, jobbra) próbatest töretfelületeinek összehasonlítása

A hajlítóvizsgálatok során megfigyelhető volt, hogy kb. 15° -os hajlítási szög felett már maradandó alakváltozás történt, az ez alatt törő próbatestek viszont ridegen, képlékeny alakváltozás nélkül törtek el (a hajlítódigramjuk, ha felrajzoltuk volna egyenes lett volna). Példaképpen a 15. ábrán egy C45-ös olajedzett próbatest (később, a 18. ábrán láthatóak közül a 3-as számú) törés után megfigyelhető maradandó alakváltozását mutatom.



15. Ábra: Olajedzett C45 próbatest maradandó alakváltozása hajlítóvizsgálat után

3.3. Keménységmérések

A harmadik mechanikai anyagvizsgálat keménységmérés volt (ld. 16. ábra). HRc keménységméréseket végeztem el azokon a próbatesteken, amiknek 40HRc feletti keménységet valószínűsítettem. Mivel a próbatestek „V” keresztmetszetűek voltak egy ék alakú alátámasztással tettem lehetővé, hogy a keménységmérések vízszintes felületen történjenek. A damaszkolt próbatestek közül a 40 rétegű csavart mintásakon nem végeztem keménységméréseket, mert azoknál a kis rétegszám miatt a keménységmérési lenyomatok kemény és lágy rétegekre is eshettek, így a mérésnek túl nagy lett volna a szórása. A 160 rétegű párhuzamos mintás próbatesteknél viszont a keménységmérési lenyomat a párhuzamos rétegekre merőlegesen jött létre, így átlagos keménységértékeket kaptunk. Próbatestenként öt keménységmérést végeztem el, amelyek értékeit átlagoltam (szerencsére jellemzően nagyon kicsi, 1-3 HRC-s szórása volt a keménységmérőnek). A keménységmérések eredményit ld. később.



16. Ábra: HRc keménységmérések

3.4. Eredmények

A bemutatott mechanikai anyagvizsgálatok tehát az alábbi mérőszámokat eredményezték:

- Csorbulás (C_s , $[\mu m]$) – Szilárdságra jellemző mérőszám
- HRc keménység – Szilárdságra jellemző mérőszám
- Határhajlító vagy maximális nyomaték (M , $[Nm]$) – szívósságra jellemző mérőszám
- Határhajlító szög (α , $[\circ]$) – alakíthatóságra jellemző mérőszám

Ez a négy mérőszám egy pengeanyag mechanikai tulajdonságait jól jellemzi. Nyilvánvalóan nagy keménység, nagy szívósság és a lehető legkisebb csorbulással jellemezhető éltartósság lenne az ideális. Az alakíthatóságot illetően legalább akkora érték kívánatos lenne, ami pl. edzési vetemedéskor egyengethetőséget biztosít. Ahogyan ezt korábban említettem, ezeknél a kis keresztmetszetű próbatesteknél kb. 15° -os hajlítás után már maradandó alakváltozás történt, azaz amelyiken ennél többet lehetett hajtani, az elvileg már valamelyest egyengethető lenne. Ezeket a meghatározott mérőszámokat az egyes próbatestekre a 3. táblázat foglalja össze. A 60° -felett meghajló próbatestek határhajlító szögére $60+$ jelölést használtam. A C15+M1 cs40 próbatestek közül az M300-as megeresztése nem sikerült jól, a mérőszámait *-gal jelöltem. A táblázatba bekerültek további 5 vízedzett próbatest mérőszámai is (36-40-es sorszámmal). A táblázatban dőlten szedett próbatestek a 17. ábrán látható összehasonlító oszlopdiagramjában nem szerepelnek.

3. Táblázat: A próbatestek mechanikai tulajdonságaira jellemző mérőszámok

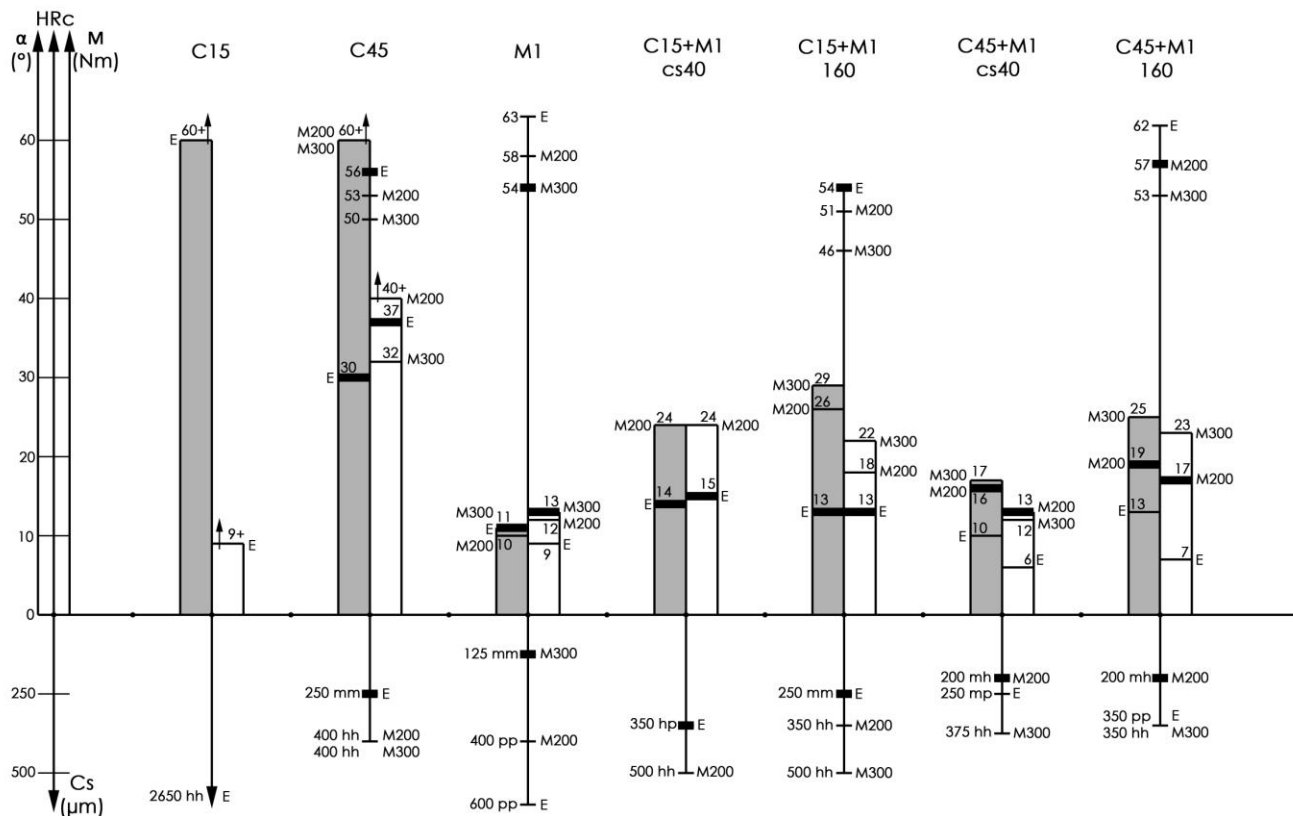
#	Anyag	Hőkezelés	Mérőszámok			
			Határhajlítási szög (°)	Max. nyomaték (Nm)	Keménység (HRc)	Csorbulás (μm)
1	C15	L	60+	7		
2		N	60+	5		
3		E	60+	9		hh / 2650
4		M200	60+	8		
5		M300	60+	8		
6	C45	L	60+	12		
7		N	60+	13		
8		E	30	37	56	mm / 250
9		M200	60+	40	53	hh / 400
10		M300	60+	32	50	hh / 400
11	M1	L	60+	26		
12		N	8	8	63	pp / 700
13		E	10	9	63	pp / 600
14		M200	10	12	58	pp / 400
15		M300	12	13	54	mm / 125
16	C15+M1 cs40	L	60+	13		
17		N	29	13		
18		E	14	15		hp / 350
19		M200	24	24		hh / 500
20		M300	15*	15*		hh / 750*
21	C15+M1 160	L	60+	11		
22		N	39	13		
23		E	13	13	54	mm / 200
24		M200	26	22	51	hh / 350
25		M300	29	18	46	hh / 500
26	C45+M1 cs40	L	60+	9		
27		N	18	9		
28		E	10	6		mp / 250
29		M200	16	13		mh / 200
30		M300	17	12		hh / 375
31	C45+M1 160	L	60+	11		
32		N	36	12	42	
33		E	13	7	62	pp / 350
34		M200	19	17	57	mh / 200
35		M300	25	23	53	hh / 350
36	ve (vizedzet) C15		60+	16		hh / 1100
37	ve C45		4	7	63	pp / 250
38	ve C15+M1 160 vizedzett		6	7	57	pp / 475
39	ve C15+M1 160 M200		16	11	55	hh / 250
40	ve C15+M1 cs40		8	9	57	pm / 250

3.5. Eredmények értékelése

A táblázatban bemutatott eredmények további kiértékelését egy jól áttekinthető formában a 16. ábrán mutatom be. Az ábrán látható, hogy az összehasonlító kiértékelésbe csak az edzett és a megeresztett hőkezeltségi állapotú a próbatesteket vettem bele, amik elméletileg alkalmasak lehetnek pengeanyagnak. Nem kerültek továbbá feltüntetésre a C15+M1 cs40-es próbatest mérőszámai. Az oszlopdiagram függőleges tengelyén a pozitív tartományban a határhajlíthatósági szög, a maximális nyomaték és a HRc keménység szerepel, a negatív tartományban pedig a csorbulás. Az egyes anyagokon belül a pengeanyagnak leginkább alkalmas hőkezeltségi állapotú próbatestek mérőszámait megvastagított vízszintes vonalakkal emeltem ki. A táblázatban ezeket a mérőszámokat szintén megvastagítottam.

Az eredmények alapján a leginkább alkalmas pengeanyagok a következők:

- C45 olajedzve (megeresztés nélkül)
- M1 olajedzve és 300°C-on megeresztve
- C15+M1 olajedzve (megeresztés nélkül)
- C45+M1 olajedzve és 200°C-on megeresztve



17. ábra: A próbatestek mechanikai tulajdonságait összehasonlító oszlopdiagram (a leginkább alkalmas pengeanyagok mérőszámai vastagítva)

Az alapanyagok

Az adatokból jól látható, hogy a C15 (várható módon) egyáltalán nem alkalmas pengeanyagnak, keménysége még edzett állapotban is rendkívül kicsi, mindössze kb. 14 HRC (ezt utólag mért mikrovickers, HV0.2 keménységértékből számoltam vissza) és az éltartóssága is nagyon rossz, csorbulása 2650 μ m, vízedzett állapotban (36-os próbatest) a csorbulás valamivel kisebb, 1100 μ m.

A C45 viszont meglepő módon tisztán edzett hőkezeltségi állapotban mutatja a legjobb mérőszámokat (olajedzésről és nem vízedzésről volt szó). Az összes leginkább alkalmas pengeanyagot tekintve az olajedzett C45 a legszívósabb, 37Nm-es maximális nyomatékkal, ez az érték a többiekének 2-3 szorosa. Ugyanilyen jó az alakíthatóságra jellemző határhajlíthatósági mérőszáma, amely 30°-ra adódott, amely érték szintén a többiekének 2-3 szorosa. Az 56 HRC-s keménység is jónak mondható. Egyedül az éltartósságban marad el a többiektől, a csorbulása 250 μ m volt. A megeresztés hatására az éltartósság nagyban romlik, a keménység is csökken, a szívósság sokat nem változik, de az alakíthatóság jelentősen nő (ez persze pengeanyagoknál nem előny). Vízedzett állapotban (#37) viszont az olajedzethez képest jelentős elridegedés figyelhető meg (az összes próbatest közül ez lett a legridegebb), az él peregve csorbul. Az olajedzett állapotra jellemző jó mérőszámok valószínűleg megeresztéssel kombinált vízedzéssel kihozhatók lennének, viszont egyrészt a megeresztés kissé körülményes kivitelezhetősége miatt, de sokkal inkább a tapasztalataim alapján a vízedzéskor jellemzően jelentkező edzési repedések miatt én nem tartom jónak ezt a hőkezelési megoldást.

Az M1-et a C45-höz hasonlítva jóval nagyobb ridegség jellemzi. Alakíthatósága megeresztett állapotban nagyon kicsi, mindössze 10° körüli (ez még a próbatesteket jellemző kis vastagság esetén sem tesz lehetővé egyengetést), szívóssága is alacsony, 9-ről 13Nm-re nő a megeresztési hőmérséklet függvényében. A keménysége viszont nagyon nagy, az edzett állapotban mért 63HRC-ről is csak 54HRC-re csökken vissza 300°C-os megeresztés után. A keménységmérések kismértékű hibáját figyelembe véve ez majdnem ugyanannyi, mint az olajedzett C45 esetén. Az éltartósságban viszont a mindössze 125 μ m-es csorbulási értékkel a 300°C-on megeresztett M1 szerepel a legjobban az összes leginkább alkalmas pengeanyag közül. Kisebb megeresztési hőmérséklet esetén az M1 elfogadhatatlanul rideg, éle nagy darabokban kiperegve csorbul. Itt jegyzem meg, hogy elképzelhető, hogy a megeresztési hőmérséklet további 50-100°C-os növelésével a csökkenő keménységet jelentősen javuló egyéb mérőszámok kompenzálnák, de ezt nem próbáltam ki (és nem is tud a kis sütőm 320°C fölé menni).

A C15, C45 és M1 alapanyagokra vonatkozóan eddig értékelt mérési eredmények a tapasztalataimmal is jól egybevág. Általában igaz az, hogy a jellemzően nagyobb élszögű, de dinamikus igénybevételeknek jobban kitett, így nagyobb szívósságot igénylő baltapengének (főleg a dobálásra szánt baltáknál) inkább a tisztán olajedzett C45 jobb, kisebb élszögű, dinamikus igénybevételnek kevésbé kitett késpengének viszont a megeresztett M1 (pl. rövid pengés faragókések). Ha a késpenge nagy dinamikus igénybevételnek van kitéve, akkor a két acélt együttesen

szoktam felhasználni hozzá, C45 jó szívósságát és az M1 jó éltartósságát egyesítve úgy, hogy a penge vaskosabb foka C45, az éle pedig M1-ből van hozzá-kovácshegesztve (pl. vonókés).

A damaszkolt próbatestek

A damaszkolt anyagok esetén a C15+M1 anyagkombináció esetén mintázattól függetlenül nehéz megmondani, hogy melyik hőkezeltségi állapot eredményez jobb mechanikai tulajdonságú pengeanyagot. Én a tisztán olajedzett választottam ki, de ez sajnos meglehetősen rideg ($\alpha=13^\circ$, $M=13\text{Nm}$). Viszont az élet megfelelően tartja ($Cs=250\mu\text{m}$) és a keménysége is elfogadható (54HRC), ezek az értékek a majdnem megegyeznek az olajedzett C45-ével. A megeresztés hatására a szívósság és alakíthatóság szépen növekszik, 300°C -on már kb. duplázódik, viszont az éltartósság nagyon leromlik, a csorbulás mértéke elfogadhatatlanul nagyra nő. Esetleg még a 200°C -os megeresztést lehet ennél az anyagpárosításnál fontolóra venni, ennek hatására ugyanis jelentős szívósság- és alakíthatóság növekedés történik, ami kompenzálja a némileg csökkenő keménységet (51HRC), de a csorbulás mértéke sajnos itt már túl nagy ($Cs=500\mu\text{m}$ cs40-es mintánál és $Cs=350\mu\text{m}$ 160-as mintánál). Ezen kívül érdemes még megnézni, hogy milyen mérőszámok jellemzik a vízedzett és 200°C -on megeresztett próbatestet, cs40-es mintával (#39). A keménység és éltartósság a tisztán olajedzett változatával majdnem megegyező, picit talán jobb (55HRC és $Cs=250\mu\text{m}$) a szívósság és az alakíthatóság pedig talán némileg jobb ($\alpha=16^\circ$, $M=11\text{Nm}$), ezekért a kis előnyökért cserébe viszont a vízedzés okozta vetemedési és repedési kockázatokat és a gazdaságtalan kétlépéses hőkezelést nem érdemes bevállalni.

Látható, hogy ez az anyagpárosítás a tisztán olajedzett C45-höz és az M1-hez képest is képest mindenképpen valamivel rosszabb mechanikai tulajdonságokkal rendelkező, alapvetően ridegebb pengeanyagot ad, illetve a tisztán olajedzett C45-höz hasonló szívósság csak keménység és éltartósság csökkenés árán érhető el.

Tapasztalataim szerint a C15+M1 anyagkombináció csak kisebb igénybevételű balta és fokosfejeknél, illetve késpengéknél (pl. nyakkéspengéknél) megfelelő. A ridegség értékelésekor azonban figyelembe kell venni, hogy pl. egy balta esetén csak a penge élétől csak kb. 20mm-es szakaszon edzett, a penge többi része és a balta teste normalizált hőkezeltségi állapotú, ezek a részek tehát jóval szívósabbak. Szintén tapasztalati megfigyelés az, hogy a vágóélen érdemes a rétegek orientációját egy 90° -os csavarással megváltoztatni úgy, hogy a penge síkjával párhuzamosan fussanak, ne pedig arra merőlegesen (ld. pl. az F_06c damaszkolt tomahawkfejemet: http://www.bucavasgyuro.net/data/termek/termek_F/F_06/c/F_06c-1_hun.jpg), mert ezzel az igénybevételekkel szemben jobban ellenálló, szívósabb vágóélt kapunk. Érdekes jelenség, hogy a hajlítóvizsgálat során a rétegek előbb említett orientációja nem mutatkozik meg szívósság- és alakíthatóság növekedésben: a cs40-es próbatestek ezekre vonatkozó mérőszámai közel azonosak a 160-asokéival, a megeresztési hőmérséklettől függetlenül (a 20-as, rosszul hőkezelt próbatest ne vegyük figyelembe). Ennek az oka az, hogy hiába jobb a 160-asok rétegorientációja, a többszöri hajtogatás miatt ezek salakosabb anyagok, ami ridegség növekedését okozza, az orientáció okozta javulás valószínűleg csak azonos rétegszámú párhuzamos és csavart mintás próbatestek összevetésével lenne látható (ld. a később bemutatandó kiegészítő kísérleteket).

A C45+M1 anyagkombinációnál a 200°C -on megeresztett próbatestek mutatják a legjobb mechanikai tulajdonságokat. Az összes leginkább alkalmas pengeanyagot tekintve a keménységben (57HRC) ezek a legjobbak és éltartósságban ($Cs=200\mu\text{m}$) is csak az M1 előz. 200°C -on megeresztve a szívósságra és alakíthatóságra jellemző mérőszámok is elfogadhatóak, az olajedzett C45 értékeinek felét eléri. A megeresztési hőmérséklet további növelése hatására viszont már csak 53HRC-s keménység, és nagyobb, $Cs=350\mu\text{m}$ körüli csorbulás jelentkezik. Tisztán edzett hőkezeltségi állapotban sajnos ez az anyagkombináció is nagy ridegséget mutat (még az M1-nél is ridegebb), és az él peregve csorbul.

Tapasztalatból tudom, hogy az ideális megeresztési hőmérséklet valahol 150°C környékén van, ilyenkor érhető el a legjobb éltartósság, de ez a bemutatott mérési eredményekből is látható. Ilyen anyagpárosítással és hőkezeléssel szoktam készíteni a késpengéimet.

A gyakorlatban fontos a normalizált hőkezeltségi állapotú damaszkolt anyagok legalább kismértékű alakíthatósága (pl. damaszkolt dísztárgyak esetén, pl. damaszkolt karperec méretre igazítása, utólagos egyengetés, alakítás hidegen is szükséges lehet). Ha megnézzük a 3. táblázatban a normalizált damaszkolt próbatestek alakíthatóságra jellemző mérőszámait, akkor azt látjuk, hogy ezek meglehetősen alacsonyak, 160 párhuzamos réteg esetén C15+M1-nél $\alpha=39^\circ$, C45+M1-nél pedig $\alpha=36^\circ$. 40 csavart réteg esetén pedig az igénybevétel szempontjából kedvezőtlen rétegorientáció miatt még kisebbek, C15+M1-nél $\alpha=29^\circ$, C45+M1-nél pedig $\alpha=18^\circ$. Ezek a kis alakíthatósági mérőszámok első sorban az ilyen kis keresztmetszetek esetén levegőn is keményre, ridegre beedződő M1 miatt jelentkeznek (a normalizált M1-nél ugyanúgy 63HRC a keménység, mint az olajedzettnél és az alakíthatóság csak 8° -os), és azt mutatják, hogy normalizált hőkezeltségi állapotban ezek a damaszkolt anyagok csak kis mértékű képlékeny hidegalakítást képesek elviselni.

A damaszkolt anyagokat illetően jól látható az, hogy bennük az alapanyagok mechanikai tulajdonságokra jellemző mérőszámok nagyjából kiátlagolódnak, tehát a damaszkolástól a közhiedelemmel ellentétben jobbak semmiképpen sem lesznek az anyagok, csak sokkal szebbek. Alapvető kérdésként vetődik fel, hogy mi okozza pontosan a damaszkolt anyagok viszonylagos ridegségét. Nyilvánvaló, hogy a hozzájuk felhasznált rideg M1-nek nagy szerepe van ebben, de nem tudni, mekkora. A ridegséget azonban okozhatják a damaszkolás kovácshegesztései során a rétegek közé bekerülő salakzárványok is. Azért, hogy a ridegségek okozó két jelenség hatását pontosabban látni lehessen és arányukat jobban meg lehessen ítélni kiegészítőleg elvégeztem egy újabb kísérletsorozatot, amit az alábbiakban mutatok be.

A salakzárványosság ridegítő- és a rétegek orientációjának hatását vizsgálándó tisztán C45-ös laposacélokból álló 5 rétegű hegesztett előgyártmányból hajtogatott próbatesteket készítettem, a korábban leírtak szerint. A próbatestek mérete és alakja is megegyeztet a korábbiakéval, de a hosszuk csak 40mm volt. Mindegyik olajedzett hőkezeltségi állapotú volt. Négyféle próbatestet csináltam:

- Olajedzett mono C45 (N) – ugyanaz mint a 13-as jelű próbatest
- Olajedzett 160 párhuzamos rétegű C45 (160)
- Olajedzett 40 csavart rétegű C45 (cs40)
- Olajedzett 160 csavart rétegű C45 (cs160)



18. Ábra: Hajtogatott C45-ös próbatestek

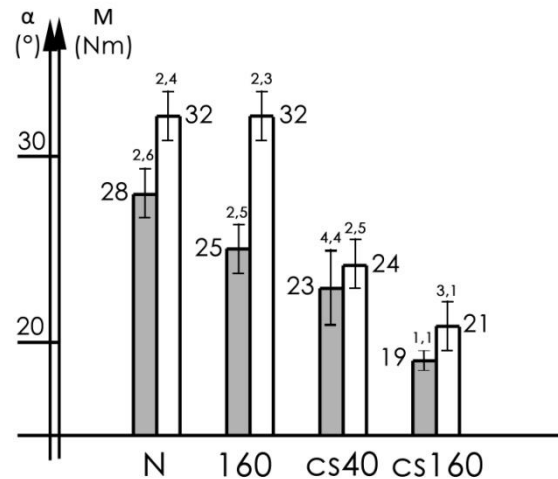
Mindegyik típusú próbatestből 5 darabot csináltam. A próbatesteket a 18. ábrán mutatom be. A próbatesteken csak hajlítóvizsgálatokat végeztem, azért hogy a szívósságra és alakíthatóságra jellemző mérőszámokat meghatározzam. A hajlítóvizsgálatok a korábbiakban bemutatottak szerint történtek. A kapott eredményeket a 4. táblázat foglalja össze. A táblázatban a 2. számú próbatest mérőszámai kiugróan kis értékűek lettek, ezeket a későbbi kiértékelésben nem vettem figyelembe. Az összehasonlító kiértékeléshez a 19. ábra mutat oszlopdiagramot. Az oszlopdiagram függőleges tengelyén eltolt léptékeztést alkalmaztam a különbségek jobb láthatósága érdekében. Az egyes oszlopok a táblázatban szereplő értékek átlagait és szórásait ábrázolják.

Az eredményekből jól látható, hogy az N-nel jelölt próbatestek közel ugyanazokat a mérőszámokat mutatják, mint az előzőleg bemutatott anyagvizsgálat olajedzett C45-ös próbatestéi ($\alpha=28^\circ$, $M=32\text{Nm}$ vs. $\alpha=30^\circ$, $M=37\text{Nm}$, ez a bemutatott hajlítóvizsgálat jó megismételhetőségére utal). A 160 párhuzamos rétegű próbatestek mérőszámai a referencia N-hez képest szinte alig csökkennek, csak az alakíthatóság csökken átlagosan 3° -ot. A 40 csavart rétegű próbatesteknél viszont már az N-hez képest nagyobb alakíthatóság és szívósságcsökkenés látható ($\alpha=23^\circ$, $M=24\text{Nm}$), míg a legridegebbek a 160 csavart rétegű próbatestek lettek ($\alpha=19^\circ$, $M=21\text{Nm}$).

Megállapítható, hogy a kovácshegesztések és hajtogatások során bevitt salakzárványok inkább csak az igénybevétel szempontjából kedvező rétegorientáció esetén nem okoznak jelentős alakíthatóság és szívósságcsökkenést (az N és a 160 értékei nagyon hasonlóak). Ha viszont a rétegorientáció kedvezőtlen (itt ez most a csavart mintázat), akkor az alakíthatóság és a szívósság is csökken, mégpedig a rétegszám növekedésével egyre nagyobb mértékben (vö. az N és a cs40, ill. cs160 értékeit). Ennek az oka úgy gondolom, az lehet, hogy a nagyobb rétegszámú anyagba a több kovácshegesztés és hajtogatás miatt több salakzárvány kerül.

4. Táblázat: A hajtogatott C45-ös próbatestek mérőszámai

#	Anyag	Mérőszámok	
		Hajlíthatóság (°)	Max. nyomaték (Nm)
1	N	32	30
2		19*	23*
3		28	34
4		27	33
5		26	29
6	160	25	32
7		27	30
8		27	34
9		21	30
10		26	35
11	cs40	18	23
12		24	24
13		25	26
14		18	20
15		28	26
16	cs160	20	20
17		19	18
18		18	20
19		17	23
20		19	26



19. Ábra: A hajtogatott C45-ös próbatestek mechanikai tulajdonságait összehasonlító oszlopdiagram

A damaszkolt próbatestekre és a csak hajtogatott C45-ös próbatesteken elvégzett hajlítóvizsátatok alapján összességében a damaszkolás mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásával kapcsolatban megállapítható, hogy a különböző anyagminőségű acélok damaszkolásakor a felhasznált acélok mechanikai tulajdonságaira jellemző mérőszámok az idénybevétel szempontjából kedvező rétegorientáció esetén (a mi esetünkben párhuzamos rétegek) nagyjából kiátlagolódnak, kedvezőtlen orientáció (a mi esetünkben csavart rétegek) esetén viszont a rétegszám növekedésével a kiátlagolódáshoz képest növekvő mértékben romlanak.

4. Metallográfiai vizsgálatok

A próbatestek mechanikai anyagvizsgálatai után néhány kiválasztott próbatesten metallográfiai vizsgálatokat végeztem. A próbatestek a következők voltak:

Alapanyagok:

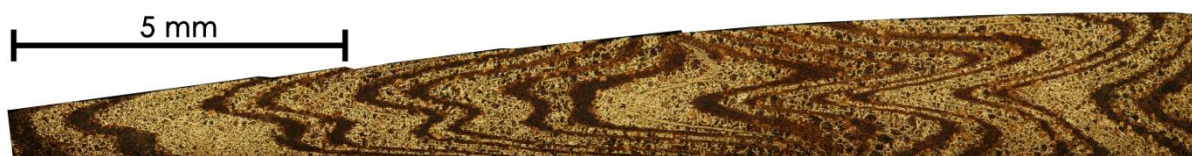
- lágyított C15 (#1), olajedzett C15 (#3)
- lágyított C45 (#6), olajedzett C45 (#8)
- lágyított M1 (#11), olajedzett M1 (#13)

Damaszkolt anyagok:

- lágyított C15+M1 cs40 (#16), olajedzett C15+M1 cs40 (#18)
- lágyított C15+M1 160 (#21), olajedzett C15+M1 160 (#23)
- lágyított C45+M1 cs40 (#26), olajedzett C45+M1 cs40 (#28)

A metallográfiai vizsgálatok elsődleges célja az volt, hogy megnézzük, milyen mértékű a szén diffúziója a damaszkolt anyagok esetén és ez mennyire egyenlíti ki a keménységet a kemény és a lágy rétegek között.

A széndiffúziót kétféle módon, lágyított hőkezeltégi állapotban a szövetszerkezet alapján, illetve olajedzett állapotban mikrokeménység mérésekkel próbáltam meg nyomon követni. A lágyított próbatestekből a metallográfiai csiszolatnak szánt keresztmetszeti mintákat a hőbevitel elkerülése érdekében egyszerű kézi vasfűrésszel vágtam ki (a lágyított M1 kivételével ez mindegyik próbatestnél könnyen ment) és a vágási felületet készítettem ki, az olajedzettek esetében pedig, mivel ezek mindegyike eltölt a hajlítóvizsátatok során, egyszerűen a töretfelületet csiszoltam fel. A mikrokeménység méréseket a csiszolatokon végeztem el 0,2kp-os terheléssel.



20. Ábra: C15+M1 40 rétegű csavart mintás (#16) próbatestből kivágott keresztmetszeti minta csiszolata

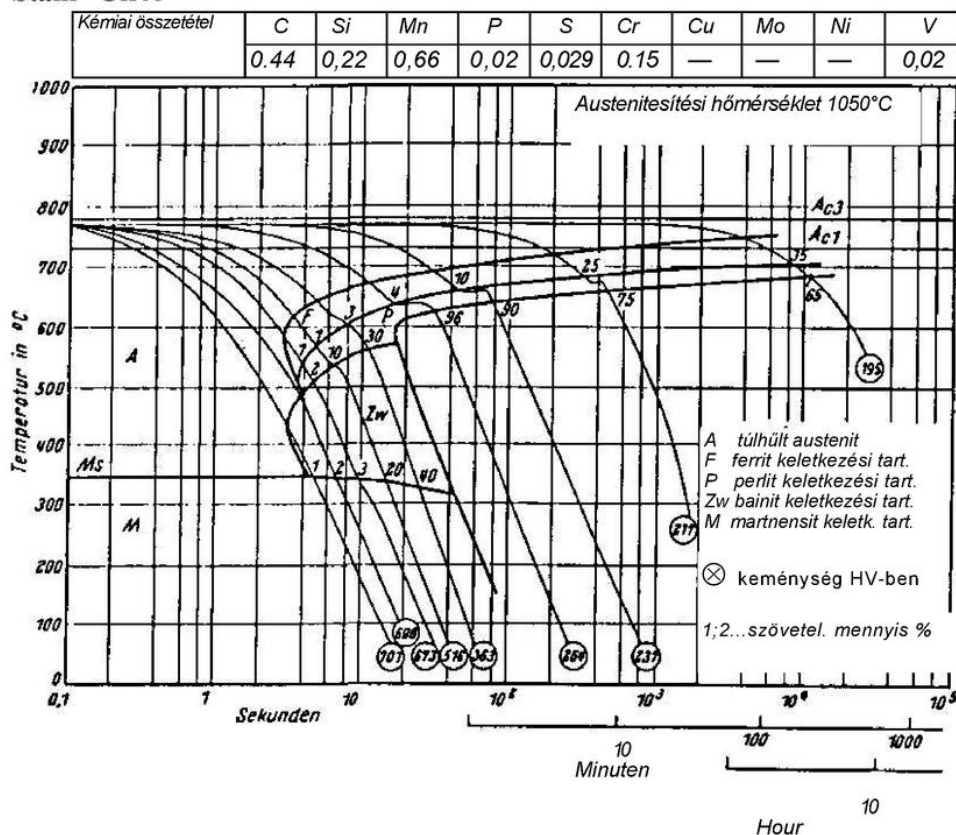
A 20. ábrán példaképpen bemutatom a lágyított C15+M1 40 rétegű csavart mintás próbatestből kivágott keresztmetszeti mintából készült, 2%-os nitállal maratott metallográfiai csiszolat mikroszkópi képekből készült mozaikját. A képen jól megkülönböztethetőek a világos színű, lágy C15-ös rétegek és a sötét, kemény M1-es rétegek. Az alapanyagokon mért mikrokeménység értékeket az 5. táblázat foglalja össze. A táblázatban a HV0.2 értékek átlagából átváltott HRC értékek is szerepelnek (csak a 20HRC felettiek).

5. Táblázat: Az alapanyagokon mért mikrokeménység értékek

#	Anyag	Hőkezelés	Keménység			
			HV0.2	HV0.2 átlag	HRC	
1	C15	L	110	103	103	-
3		E	184	183	179	-
6	C45	L	223	221	214	-
8		E	671	690	682	59
11	M1	L	445	409	397	43
13		E	813	825	794	64

Itt térnék ki röviden annak a jelenségnek a magyarázatára, hogy a vékony, olajedzett C45-ös próbatestek miért bizonyultak meglepően szívósnak. Korábban én azt gondoltam, hogy az olajedzés során a vízedzéshez képesti kisebb lehűlési sebesség miatt a kialakuló szövetszerkezetben megjelenő sok bainit okozza ezt, amely a mertenzitnél jóval szívósabb szövetelem. Azonban, ha a C45 folyamatos hűtésű átalakulási diagramját (C-görbe) tekintjük (ld. 21. ábra), akkor azon balról a második (686 HV) felelne meg a mi esetünknek a 681 HV0.2 mikrokeménység alapján. Ha viszont a korábbi 56 HRC-s keménységmérési eredményt vesszük figyelembe, akkor az 613 HV-nek felel meg, ami a balról harmadik lehűlési görbéhez esik közel (643 HV). A C-görbéből látható, hogy valamennyi bainit valóban lesz a szövetszerkezetben, azonban sajnos a jelenlétét nem tudtam a metallográfiai csiszolaton megfigyelni (egyszerűen nem tudtam elegendően nagy nagyítás mellett jó képet készíteni, ehhez legalább 1000x-es nagyítás kellett volna, én pedig 500x-ig tudtam elmenni). A bainit mennyiségének C-görbék alapján történő meghatározása viszont a mi esetünkben a próbatestekhez használt C45 pontos kémiai összetétele ismeretének hiányában és a viszonylag pontatlan keménységméréseink miatt nagyon bizonytalan.

Stahl Ck46



21. Ábra: A C45 folyamatos hűtésű átalakulás diagramja 1050°C-os ausztenitesítési hőmérsékletre

Az ábrán látható C görbe 1050°C-os ausztenitesítési hőmérsékletre tartozik, ami a szokványos A3 + 20..50°C-nak megfelelő kb. 850-880°C-nál valamivel nagyobb. Azért ezt a C görbét használom most, mert én jellemzően az edzést a 950-1000°C körüli tartományból indítom, a munkadarabot koksztűzben hevitem erre a narancssárgás izzásnak

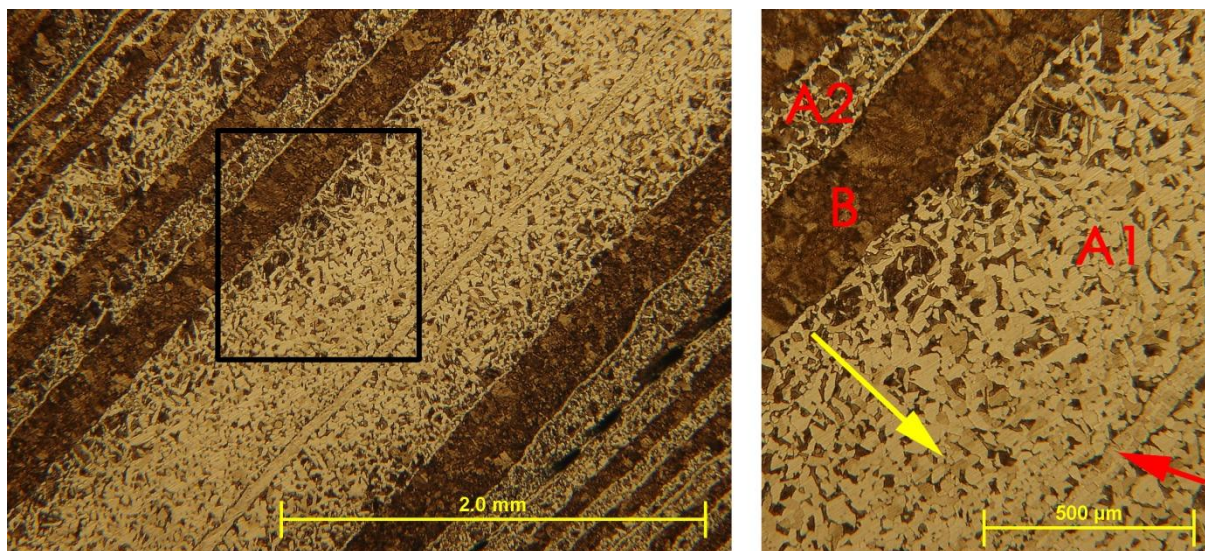
megfelelő hőmérsékletre. A növekvő ausztenitesítési hőmérséklet a C görbékét kissé jobbra tolja el és ugyanolyan lehűtési sebesség nagyobb keménységet eredményez.

A szívósságra adható másik magyarázat az, hogy a vízédzéshez képest lassabb lehűlési sebességet eredményező olajédzésnél a martenzit kialakulása után (az Ms vízszintes vonal alatt) van lehetőség a kialakult martenzit kis mértékű bomlására, megeresztődésére is. Összeségében azonban ennyi anyagvizsgálati eredmény alapján még nem lehet megmondani, hogy a bainit jelenléte vagy a martenzitbomlás milyen arányban játszik szerepet a vékony, olajédzett C45-ös próbatestek meglepően szívós viselkedésében.

A széndiffúzió jelenségének vizsgálatára a nagy széntartalom különbségű C15 és M1 anyagok párosításával készült damaszkolt próbatestek voltak alkalmasak. A vékony damaszkolt penge próbatestek estén a széndiffúzió a lágyított mintákon nem volt túl jól megfigyelhető, mert a rétegek túlságosan vékonyak voltak, a vastagságuk a 40-es rétegszám esetén kb. 100 μm , 160 rétegszámnál pedig mindössze pár tíz μm . A széndiffúzió jelensége akkor volt jobban látható, amikor a rétegek vastagabbak voltak, kb. mm-esek. A damaszkolt anyagokban megfigyelhető diffúziós jelenségek vizsgálatára ezért az eddig bemutatott penge próbatestekből kivágott mintákon kívül két másik mintát is előkészítettem. A damaszkolt fokosaimnál használt vastag, 20x20mm-es keresztmetszetű, 160 rétegű C15+M1-ből álló damaszkolt előgyártmányok egyikének a végéből egy darabot vágtam le. Ezt a darabot félbe vágva ugyanaz a keresztmetszetet vált vizsgálhatóvá. Ez egyik próbatestet lágyítottam, a másikat olajban edzettem (ld. 22. ábra). A szén rétegek közötti diffúziós folyamatait a szövetszerkezet alapján a lágyított mintán (ld. 23. ábra), a mirokeménységek alapján pedig az edzett mintán (ld. 25. ábra) lehetett a legszemléletesebben bemutatni.



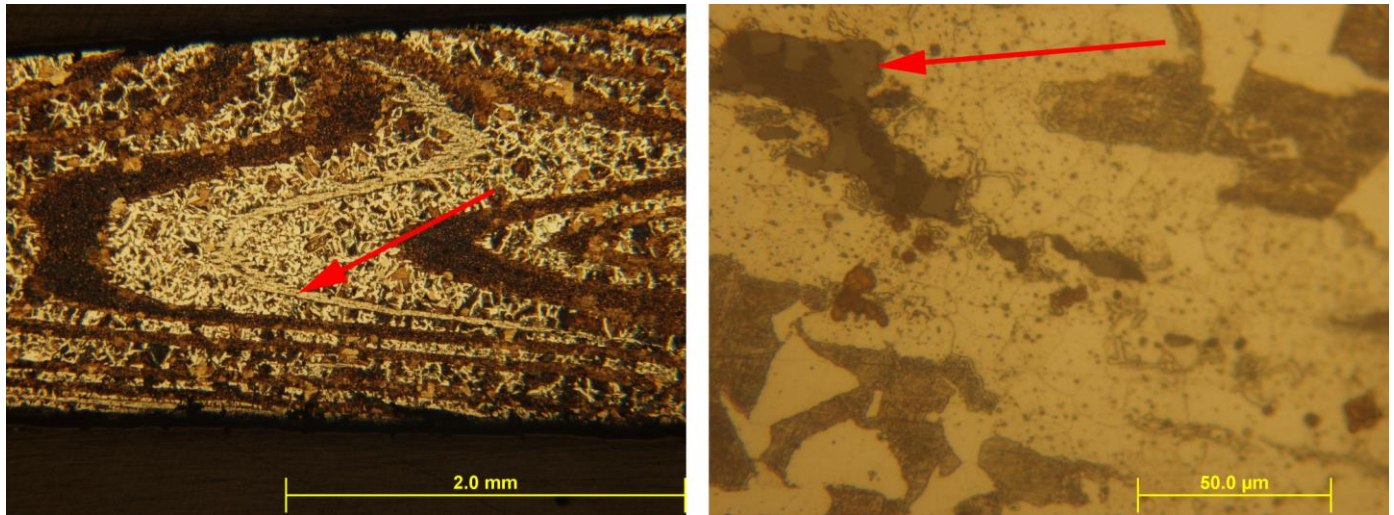
22. Ábra: Lágyított (balra) és olajédzett (jobbra) 160 rétegű C15+M1 minták 20x20x10mm-es befoglaló mérettel



23. Ábra: Lágyított, vastag 160 rétegű C15+M1 mikroszkópi képei

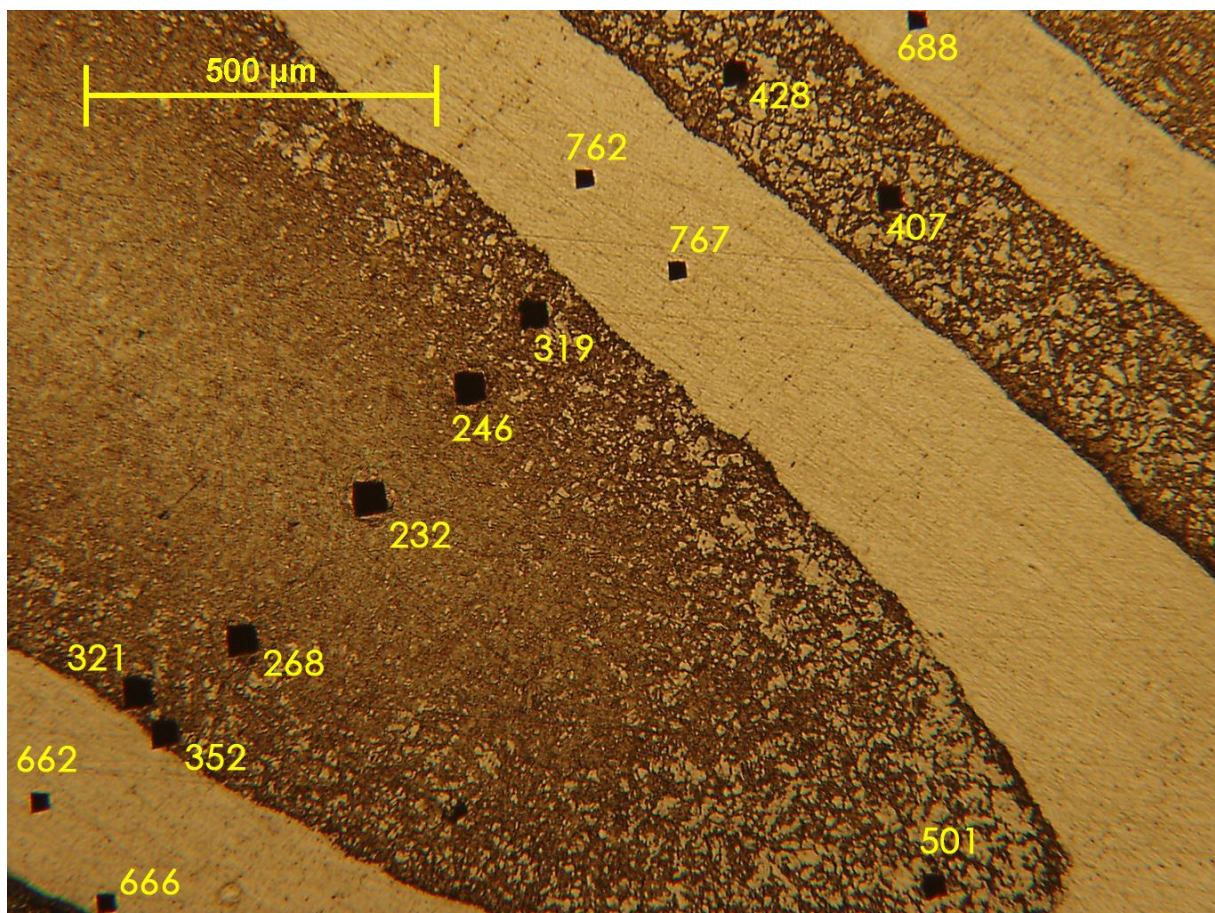
A mikroszkópi képen látható világos rétegek a C15-nek (23. ábra „A1”-gyel és „A2”-vel jelölt rétege), a sötétek pedig az M1-nek felelnek meg (23. ábra „B”-vel jelölt rétege). Megfigyelhető, hogy minél vékonyabb az adott C15 réteg, annál inkább felszenítik a szomszédos M1 rétegek. Pl. a vékony A2 réteg jobban felszenült, mint az vastagabb A1. Vastagabb C15 rétegek esetén továbbá látható egy karbongradiens (az A1 rétegben sárga nyíllal jelölve), azaz a vastag C15 rétegek szélei nagyobb, belsejük viszont kisebb széntartalmú. Az A1 réteg közepén (a 23. ábrán piros nyíllal jelölve) egy kovácshegesztési vonal látható. Mivel a kiinduló 5 rétegű hegesztett előgyártmányban C15 a két szélső réteg, ezért a kovácshegesztendő felület minden visszahajtásnál a C15 anyag felülete lesz, így a damaszkolt próbatesteken a kovácshegesztési vonalak mindig az C15 rétegek közepén figyelhetők meg.

A kovácshégesztési vonalakban a korábban már tárgyalt salakzárványok is jól megfigyelhetők (ld. 24. ábra, piros nyilakkal jelölve). A 25. ábra jobb oldalán még a salakzárvány szövetszerkezete is látható.



24. Ábra: Hegesztési vonal C15+M1 cs40-es (#) próbatest C15 rétegének közepén (balra), salakzárvány a hegesztési vonalban (jobbra)

A széndiffúzió miatt a lágy és a kemény rétegek közötti keménységkülönbség is csökken. Ez jól megfigyelhető a 22. ábrán bemutatott edzett 160 rétegű C15+M1 mintán (ld. 25. ábra). A keménységmérésekhez olyan területet kerestem, ahol együtt láthatók széles és vékony C15 rétegek. Látható, hogy az M1 rétegei kb. 650-750 HV0.2 keménységűek. A vékonyabb C15 rétegek jobban fel tudnak szénülni (ahogyan ez a lágyított mintákon már látható volt), 428 és 407 HV0.2 keménységek voltak mérhetők, a szélesebb C15 réteg esetén pedig a kevésbé szénültek fel és a szélektől befelé haladva csökken a keménység kb. 350 HV0.2-ről 230 HV0.2-re (vö. az előzőleg bemutatott karbongradiens a széles C15 rétegekben). A széles C15 réteg sarka viszont már 501 HV0.2 keménységű volt (ld. a 25. ábra jobb alsó részén). Összehasonlításképpen edzett esetben a C15 csak 182 HV0.2, az M1 pedig 811 HV0.2 keménységű volt (ld. 5. táblázat).

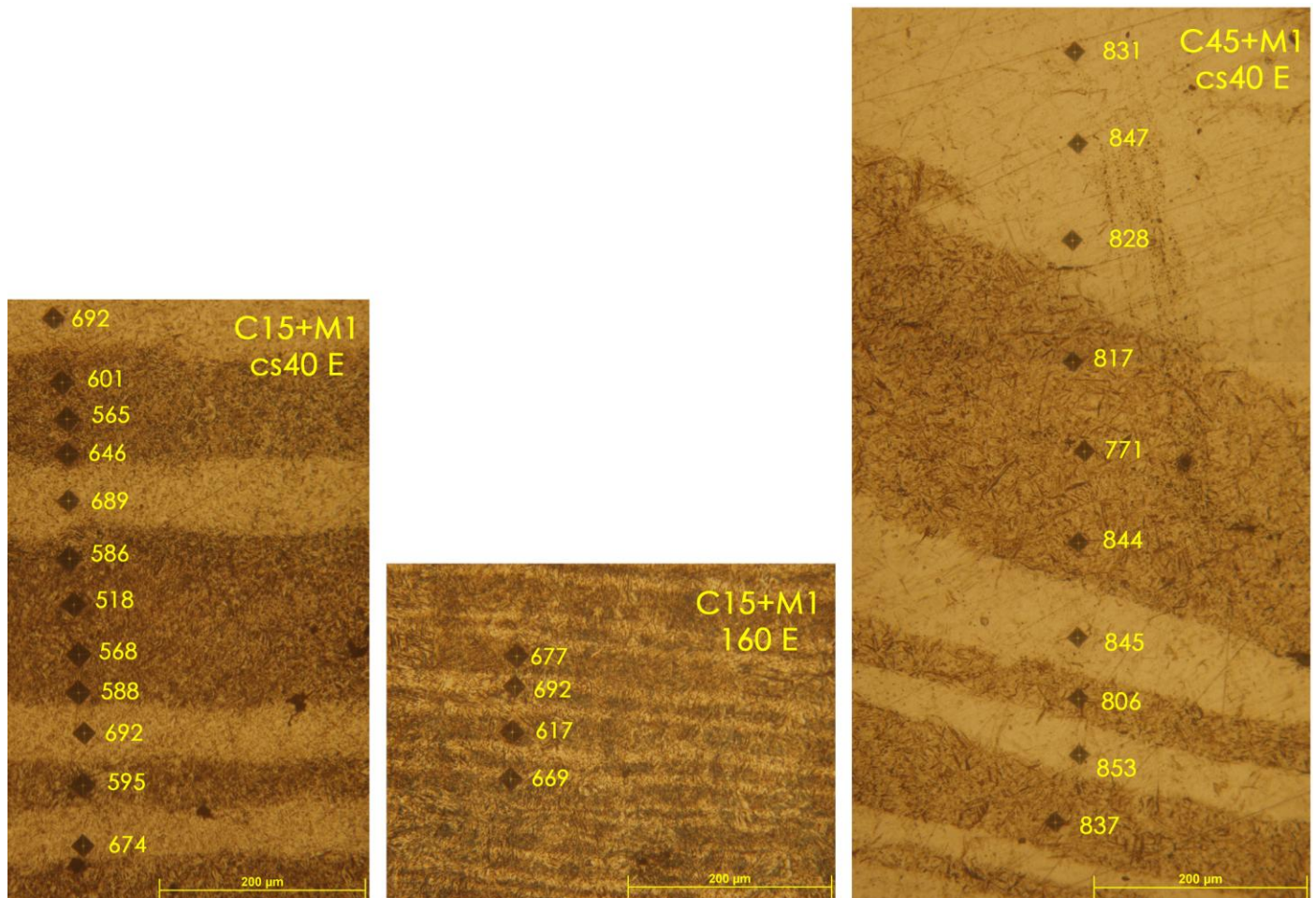


25. Ábra: Mikrokeménység mérések edzett, vastag 160 rétegű C15+M1 próbatesten

A széndiffúzió jóval erőteljesebb a penge próbatestek vékonyka rétegei között. A 26. ábrán látható, hogy a kb. 50-100 μm rétegvastagságú C15+M1 cs40 edzett mintánál a C15 rétegek keménysége 550-600 HV0.2, az M1 rétegek pedig kb. 700 HV0.2 keménységűek, azaz látható, hogy a keménységekülönbség a lágy és kemény rétegek között kicsi, mindössze kb. 100-150HV.

A rétegek további vékonyodásával a kb. 10-20 μm rétegvastagságú C15+M1 160 edzett mintánál a C15 rétegek és M1 rétegek keménységének különbsége még tovább csökken, itt már csak kb. 50 HV0.2.

Megfigyelhető az is, hogy a C45+M1 anyagpárosítás esetén az M1 keménysége kevésbé csökken, mint a C15+M1-nél. a C45+M1 cs40 edzett mintánál az M1 rétegek 800 HV0.2 feletti keménységűek maradnak, mert a C45 nagyobb széntartalmánál fogva kevésbé „szívja ki” a szént az M1 rétegekből, mint a C15. Ennél a mintánál látható az is, hogy alig van keménységekülönbség a C45 és az M1 rétegek között, mindössze kb. 50 HV0.2.



26. Ábra: Mikrokeménység mérések edzett, vékony penge próbatesteken

A metallográfiai vizsgálatok után végeztem SEM-EDS méréseket is, hogy lássam a damaszkolt mintákban a lágy és kemény rétegek között egyéb ötvözők diffúzióját is. Ezek a mérések azonban nem voltak túlzottan sikeresek, ugyanis a Mn-nal a C15 és az M1 is hasonlóan ötvözött, a Cr-nak és a V-nak a néhány tized %-os mennyisége az M1-ben pedig ennek a módszernek a méréshatára körül van.

Összességében a metallográfiai vizsgálatok alapján megállapítható az, hogy a damaszkolt anyagokban jelentős szerepe van a lágy és a kemény rétegek közötti széndiffúzióknak, amely a rétegek vékonyodásával (a rétegszám növekedésével) erősödik és ennek következtében a rétegek közötti keménységekülönbség jelentősen csökken (nagy rétegszám esetén akár el is tűnik).

Ennek a jelenségnek a tisztázása amiatt érdekes, mert sokan úgy gondolják, hogy a damaszkolt anyagok esetén nagy a rétegek közötti keménységekülönbség, ami a rétegek eltérő kopását okozza, és pl. csavart mintázat esetén idővel egyfajta fűrészfogas él alakul ki. Ez a bemutatott anyagpárosításnál és feltételezhetően más szénacél- vagy enyhén ötvözött acélpárosításoknál nincs így.

5. Összefoglalás

A C15+M1 és C45+M1 anyagpárosításokkal damaszkolt anyagokon elvégzett anyagvizsgálati eredmények alapján az alábbi 3 fő általános megállapítás tehető:

- A damaszkolt anyagok elkészítésekor a leégési veszteségek jelentősek, egy kb. 500g-os hegesztett előgyártmány esetén 20-25%. A leégési veszteségek jórészt a kovácshégesztések miatt jelentkeznek.
- A damaszkolás mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásával kapcsolatban megállapítható, hogy a különböző anyagminőségű acélok damaszkolásakor a felhasznált acélok mechanikai tulajdonságaira jellemző mérőszámok az igénybevétel szempontjából kedvező rétegorientáció esetén (a mi esetünkben párhuzamos rétegek) nagyjából kiátlagolódnak, kedvezőtlen orientáció (a mi esetünkben csavart rétegek) esetén viszont a rétegszám növekedésével a kiátlagolódáshoz képest növekvő mértékben romlanak.
- A damaszkolt anyagokban jelentős szerepe van a lágy és a kemény rétegek közötti széndiffúciónak, amely a rétegek vékonyodásával (a rétegszám növekedésével) erősödik és ennek következtében a rétegek közötti keménységkülönbség jelentősen csökken (nagy rétegszám esetén akár el is tűnik).

A pengékhez használható, bemutatott konkrét C15, C45 és M1 acélalapanyagokkal, anyagpárosításokkal és hőkezelésekkel kapcsolatban a következő megállapítások tehetők:

- Az olajedzett C45 a vékony pengék esetén kiváló szívóssági tulajdonságokkal és jó keménységgel, éltartóssággal rendelkezik. Dinamikus igénybevételnek kitett baltapengékhez alkalmas.
- Az M1 olajedzett és 300°C-on megeresztett hőkezeltési állapotban mutatta a legjobb mechanikai tulajdonságokat. Bár rideg, ennek volt az összes lehetséges változat közül a legjobb az éltartóssága. Dinamikus igénybevételnek kevésbé kitett késpengéknek alkalmas.
- A C15+M1 anyagpárosítással damaszkolt anyagok vagy tisztán olajedzett állapotban (ekkor keményebbek, éltartóbbak, de ridegebbek) vagy 200°-on megeresztve (ekkor a keménység és éltartósság rovására szívósabbak) mutatják a legjobb mechanikai tulajdonságokat. Kisebb igénybevételre szánt kés és baltapengékhez megfelelő, de fontos a rétegek igénybevételek szempontjából megfelelő orientációja.
- A C45+M1 anyagok vagy tisztán olajedzett és 200°C-on megeresztett hőkezeltési állapotban mutatta a legjobb mechanikai tulajdonságokat. A 300°C-on megeresztett M1-nél szívósabb, keménysége és éltartóssága viszont nagyjából ugyanolyan jó. Késpengékhez kiválóan alkalmas, még a damaszkolással bevitt salakzárványok ellenére is az M1-nél kicsit jobb, de itt is fontos a rétegek igénybevételek szempontjából megfelelő orientációja.