



**MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI
KAR**



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

**Szerszámacélok szikraforgácsolásának vizsgálata a megmunkált
felületek érdessége alapján**

Fekete Vivien
II. éves gépgyártástechnológus
MSc. mesterszak

Konzulens:
Dr. Maros Zsolt
egyetemi docens
Gyártástudományi Intézet

Miskolc, 2022

A konzulens nyilatkozata

Alulírott, Dr. Maros Zsolt a Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézetének egyetemi docense a Szerszámacélok szikraforgácsolásának vizsgálata a megmunkált felületek érdekessége alapján című TDK dolgozatot beadásra alkalmasnak ítélem.

Miskolc, 2022.11.07.



.....
a konzulens aláírása

Eredetiség nyilatkozat

Alulírott Fekete Vivien, a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának hallgatója büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és aláírásommal igazolom, hogy ezt a dolgozatot saját magam készítettem, a benne leírt vizsgálatokat – ha ezt külön nem jelzem – magam végeztem el, és az ismertetett eredményeket magam értem el. Adatokat, információkat csak az irodalomjegyzékben felsorolt forrásokból használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Miskolc, 2022.11.07.



.....
a hallgató aláírása

Tartalom

1. Bevezetés.....	4
2. A szikraforgácsolás elméleti alapjai.....	5
2.1. A szikraforgácsolás sajátosságai.....	5
2.2. Az anyagleválasztás folyamata	7
2.3. A szikraforgácsolás szerszámanyagai.....	8
2.4. A folyamat technológiai jellemzői és teljesítménymutatói.....	10
2.5. VDI fokozat	12
2.6. A szikraforgácsolt felület érdekessége és szerkezete	13
3. A felület érdekességi paramétereinek ismertetése	16
3.1. A felületi mikrogeometria jellemzői.....	16
3.2. A felület mikrogeometriáját jellemző paraméterek	17
3.2.1. Amplitúdó paraméterek	17
3.2.2. Térköz paraméterek	18
3.2.3. Anyaghányad és funkcionális paraméterek	19
3.3. A felületi mikrogeometria topográfiai (3D) jellemzői.....	21
4. Kísérleti körülmények	23
4.1. A kísérletek megvalósításához használt szerszámgép	23
4.2. Megmunkált anyagok	24
4.3. Szerszámelektrodák	27
4.4. A szikraforgácsolási kísérletek kivitelezése, technológiai paraméterek.....	27
4.5. Az alkalmazott mérőberendezés és mérőeszköz jellemzői, a mérések kivitelezése	29
5. Kísérleti eredmények kiértékelése	32
5.1. Amplitúdó paraméterek vizsgálata	32
5.2. Térköz paraméterek vizsgálata	34
5.3. Anyaghányad és funkcionális paraméterek vizsgálata	35
5.4. Felülettopográfiai jellemzők vizsgálata	38
5.5. A szerszámanyagok hatása a vizsgált szerszámacélok felületminőségére	42
5.6. Az elektrodák számának hatása az érdekességi és topográfiai paraméterekre	49
5.7. Termelékenységi jellemzők vizsgálata	52
5.8. Szerszámacélok szikraforgácsolásának hatása a méretpontosságra	54
6. Következtetések, összegzés.....	55
7. Köszönetnyilvánítás	58
Irodalomjegyzék	59

1. Bevezetés

A szikraforgácsolás az egyik legjelentősebb elektroeróziós megmunkálás. Az eljárás az elektromos szikra erodáló hatásán alapszik, melynek lényege, hogy a megfelelően szabályozott szikrakisülések helyi roncsolódást idéznek elő a megmunkált anyag felületén, ezáltal különféle térbeli alakzatok hozhatók létre.

A szikraforgácsolást előszeretettel alkalmazzák a szerszámgyártás, ezen belül például a műanyag fröccsöntő szerszámok előállítására. Ennek oka a fröccsöntés során használt acél szerszámlapokon és formabetéteken létrehozandó strukturált felületminőség (mintázat), ami a műanyag alkatrészek esztétikai minőségének kialakításában játszik fontos szerepet. A megfelelő mintázat, minél precízebb megvalósítása függ például a megmunkált anyagminőségtől, a szerszámelektroda anyagától, számától, a szerszám gép konstrukciójától és még számos technológiai paramétertől. A korábbi, releváns kutatások, többnyire egy adott ötvözet megmunkálásához szükséges technológiai adatok optimalizálására összpontosítanak, nem tárgyalják a különböző szerszámacélok viselkedésének összehasonlítását.

TDK dolgozatomban, – a felsorolt indokok következtében is – tömbelektrodás szikraforgácsolással megmunkált, különböző ötvözésű szerszámacélok viselkedésének összehasonlító vizsgálatával kívánok foglalkozni. A kutatás megvalósítása érdekében, négy különböző – a fröccsöntő iparban is gyakorta használt – szerszámacél próbadarabon szikraforgácsoltam különböző felületminőségű üregeket réz (vörösréz), illetve grafit elektródákkal. Az összehasonlítás alapjául a megmunkált felület mikrogeometriai jellemzői, a megmunkálás méretpontossága és termelékenysége szolgálnak. Az eltérő munkadarab anyagokból kifolyólag vizsgálom továbbá, hogy a kísérletek elvégzése során alkalmazott egyes szerszámanyagok milyen hatással vannak a teljesítménymutatókra, illetve, hogy az elektródák számának növelése, hogyan befolyásolja a megmunkálás eredményét.

A mikrogeometriai jellemzők elemzése érdekében, megvizsgálom a felület 2 dimenziós érdességi paramétereit, azaz az amplitúdó, a térköz és a funkcionális paramétereket, a felület karakterisztikájának pontosabb feltárása érdekében pedig a 3 dimenziós felülettopográfiai jellemzőit is. Ezen kívül ellenőrzöm az üregek mélységének méretpontosságát. A termelékenységre a megmunkálási időkből számítható anyagleválasztási sebességből fogok következtetni.

Kutatásom célja, választ kapni arra a kérdésre, hogy a különböző ötvözésű szerszámacélok eltérő módon viselkednek-e szikraforgácsolás hatására. Továbbá kíváncsi vagyok arra is, hogy az elektróda anyagának változtatása milyen hatással van a szikrázás eredményére, illetve, hogy az egyes munkadarab anyagok esetén melyik típusú elektróda alkalmazása a kedvezőbb. Ezen kívül szeretnék ismereteket szerezni arról is, hogy a hatékonyabb megmunkálás érdekében érdemes-e, illetve megéri-e több elektródát alkalmazni.

2. A szikraforgácsolás elméleti alapjai

A szikraforgácsolás egy olyan különleges megmunkáló eljárás, mely során a villamos energiát közvetlenül hőenergiává alakítva, az anyag helyi megolvasztásával, elgőzölögtetésével történik meg az anyagleválasztás. Elektromosan vezetőképes, nagy keménységű, edzett anyagok munkálhatók meg vele mechanikai és vegyi tulajdonságuktól függetlenül.

Alapvetően kétféle szikraforgácsoló eljárást különböztetünk meg:

- tömbelektródás szikraforgácsolás: megmunkálás során a célszerűen kialakított szerszámelektróda negatívja átmásolódik a felületre bonyolult, térbeli alakzatokat létrehozva ezzel
- huzalelektródás szikraforgácsolás: alapjait tekintve az eljárás hasonló elveken alapul, mint a tömbelektródás változat, azonban itt a szerszám szerepét egy vékony huzalelektróda tölti be, melynek köszönhetően bonyolult kontúrok körülvágása valósítható meg

Dolgozatomban a tömbelektródás szikraforgácsolás kérdéskörével foglalkozom, ezért a továbbiakban ezen eljárás elméleti alapjait fogom ismertetni.

2.1. A szikraforgácsolás sajátosságai

Szikraforgácsoláskor két, szigetelő folyadékba (dielektrikumba), ún. munkafolyadékba merített villamos elektróda között kisüléssorozatot hozunk létre, és ennek eredményeként az egyik elektródán (munkadarab) kialakul a másik elektróda (szerszámelektróda) alakjának lenyomata. [1]

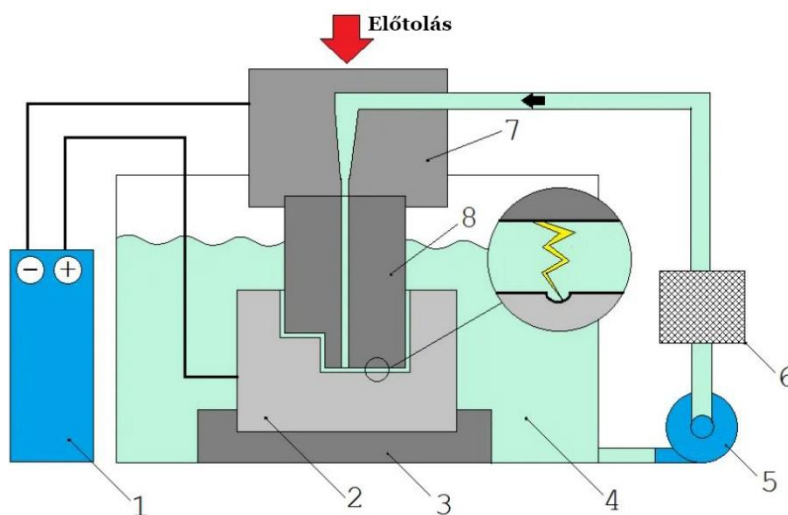
A szikrakisülések akkor jöhetnek létre a két elektróda között, ha [1]:

- nem érintkeznek egymással, de a távolságuk akkora, hogy a közöttük levő feszültség átüti a közbülső teret kitöltő munkafolyadék szigetelési szilárdságát,
- az elektródákra nem állandó egyenfeszültséget, hanem feszültségimpulzusokat adunk,
- a két elektróda távolsága megmunkálás közben állandó (ezt az előtolás- vagy a szikraköz-szabályozó berendezés szabályozza)

Az 1. ábrán az eljárás elvi vázlata látható, mely szerint a rendszer elemei a következők:

1. Generátor: feladata a szikraforgácsoláshoz szükséges energia biztosítása, a szikrakisülések szabályozása. Alapvetően két típusa ismeretes: a relaxációs generátorok és a független impulzusgenerátorok
2. Munkadarab: az egyik elektródafél, melyre a megmunkálás során átmásoljuk a szerszám pontos képét
3. Munkadarab befogó: feladata a munkadarab stabil megfogása, illetve a munkadarab szerszámhoz viszonyított helyzetének, elmozdulásának biztosítása
4. Dielektrikum: más néven munkafolyadék. Fő feladata, hogy a megmunkálás során elszigetelje a szerszámelektródát és a munkadarabot egymástól, illetve hűtse azokat.

- Ezen kívül hűti és elvezeti a munkatérből a leválasztott anyagrészecskéket, a szikraforgácsolás során részt vesz a vezető csatorna kialakításában, tárolja és elvezeti a folyamat alatt keletkezett hőt, valamint elszigeteli a környezetet a feszültség alatt álló elemektől, ami balesetvédelmi szempontokból fontos. A leggyakrabban alkalmazott munkafolyadékok a petróleum, a transzformátorolaj és a deionizált víz
5. Szivattyú: feladata a dielektrikum keringetése a munkatartály és a szűrő között, továbbá a munkatér öblítésének biztosítása. Az öblítés az előtolás irányának függvényében lehet vegyesáramú, egyenáramú, ellenáramú és folyadéksugaras
 6. Szűrő: feladata a leválasztott anyagrészecskék és a káros, idegen anyagok kitisztítása a munkafolyadékból
 7. Elektrodatartó, előtoló fej: biztosítja a szerszámelektroda felfogását, valamint a kellő előtoló mozgást a szikraköz folyamatos fenntartásához (figyelembe véve a szerszámkopás mértékét és munkadarabról leválasztott anyag mennyiségét)
 8. Szerszámelektroda: a másik elektródafél, mellyel a munkadarab készre munkálását végezzük



1. ábra A szikraforgácsolás elvi vázlata [2]

A szikraforgácsolás előnyei közé sorolható, hogy rendkívül kemény és edzett anyagok megmunkálására alkalmas. Az eljárással különösen bonyolult formák és igen kis munkadarabok sorjamentes gyártása is megoldható. Megmunkálás során a szerszám elektróda nem érintkezik a munkadarabbal, így nem keletkeznek mechanikai feszültségek, nem lép fel rezgés, az alkatrész nem torzul. Ennek köszönhetően jó felületminőség és akár mikrométeres pontosság is elérhető vele. Hátrányai közé sorolható, hogy szikraforgácsolással csak elektromosan vezető anyagok munkálhatók meg. A megmunkálás ideje lassú, magas a fajlagos energiafogyasztása. Ezen kívül az éles sarkok reprodukálása nehézkes az intenzív szerszámkopás miatt. A bonyolult elektródaformák gyártása többletidőt jelent, valamint költségessé teszi magát a technológiát. Előnyeit tekintve az eljárást előszeretettel alkalmazzák a szerszámgyártás, főként a műanyag fröccsöntés területén, továbbá az autó- és repülőgépiparban, valamint az orvosi eszközök gyártása esetén is. [2] [3] [4]

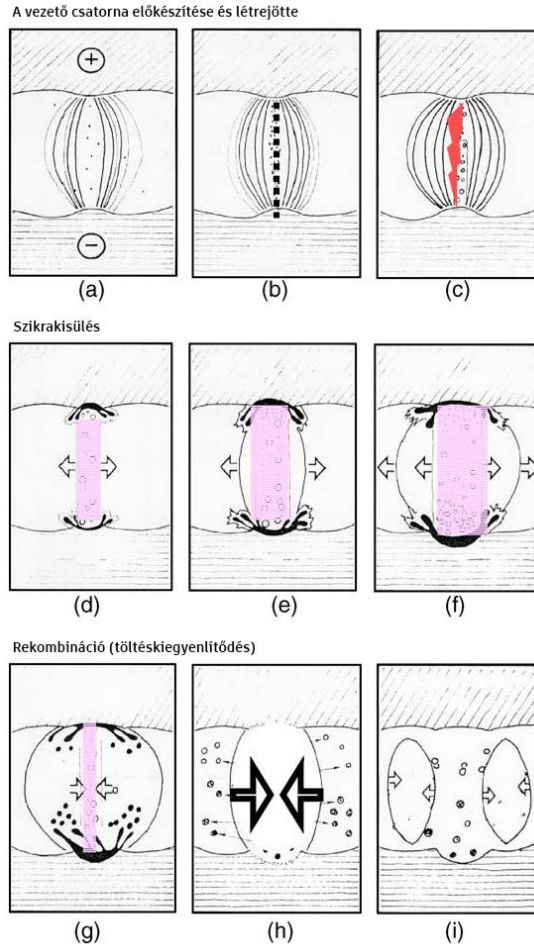
2.2. Az anyagleválasztás folyamata

A szikrakisülések anyagleválasztó tulajdonságát a szikraforgácsolás sűrűn megismételt impulzusok útján hasznosítja. A szikrakisülés mindig a két elektróda (szerszám, munkadarab) közötti legkisebb résnél keletkezik, így fokozatosan a szerszám mása alakul ki a munkadarabban. [5]

Az anyagleválasztás során lejátszódó jelenségek alapján a folyamatot három szakaszra oszthatjuk [6]:

1. A vezető csatorna előkészítése és létrejötte
2. Szikrakisülés
3. Rekombináció (töltés kiegyenlítődé)

Az anyagleválasztás folyamatának pontos lépéseit a 2. ábra szemlélteti. Ha két áramvezető szilárd testet (elektródát) szigetelő folyadékba merítünk és rájuk egyenfeszültséget kapcsolunk, közöttük villamos erőter alakul ki (2. (a) ábra). Ennek erőssége ott a legnagyobb, ahol az elektródák egymáshoz a legközelebb vannak. Az erőter hatására a katódról elektronok lépnek ki és az anód felé haladnak (ún. hideg emisszió) (2. (b) ábra). Mozgásuk során ütköznek a szigetelő folyadék (dielektrikum) molekuláival és azokat ionizálják. A villamos tér hatására ezek az elektronok is tovább haladnak az anód felé, aminek következtében ütközések, ionizációk sorozata, vagyis lökésionizáció alakul ki (2. (c) ábra). A folyamat lavinaszerűen felgyorsul, a két elektródát egymástól elválasztó folyadék szigetelőképességét átüti a feszültség (2. (d) ábra). Az elektródák között vezető csatorna, ún. ioncsatorna jön létre. Az ioncsatorna ellenállása kicsi, így igen nagy áramot tud át bocsátani igen rövid idő (1...10 μ s) alatt. (A szikrakisülés időtartama annál nagyobb, minél nagyobb a kezdeti feszültség és a felszabaduló energia.) Az ioncsatornában felgyorsult elektronok az anódra csapódva annak felületét megolvasszják (2. (e) ábra), az igen magas hőmérsékleten a fém gőzbuborék formájában kivetődik (2. (f) ábra), magával ragadva az olvadék egy részét is. Az olvadék az elektródák közötti térben lehül és megszilárdul, széteszik a folyadékban, a becsapódás helyén pedig üreg keletkezik (2. (g) ábra). Ha az energia-utánpótlást fenntartjuk, a szikrakisülés ívkisüléssé stabilizálódik, ezért az energia-utánpótlást meg kell szakítani. Ennek hatására ugyanis összeomlik a kisülési csatorna, a buborék gyorsan lehül és összehúzódik (2. (h) ábra). Ezt követően a vezető részecskék száma rohamosan csökken (deionizálódás), vagyis az elektródák közötti térben létrejön az eredeti állapot, lehetőséget teremtve az újabb szikrakisülésnek. (2. (i) ábra). [1]



2. ábra Az anyagleválasztás során végbemenő folyamatok [6]

A szikraforgácsolás, mint megmunkáló folyamat lényeges eleme az, hogy a kisülés csak korlátozott ideig maradjon fenn, mert a tartós hőhatás a munkadarab felületén kiterjedt károsodást (beégést) okoz. Ahhoz, hogy két egymást követő kisülés ne ugyanott jöjjön létre, a vezetővé vált munkafolyadék deionizálódása szükséges, melynek során – legalább részben – visszanyeri eredeti szigetelő tulajdonságait. Ehhez bizonyos idő szükséges, mely nemcsak a folyadék mineműségétől és szennyezettségétől, hanem a kisülés során átalakuló energia mértékétől is függ. [7]

2.3. A szikraforgácsolás szerszámanyagai

A szerszámelektrodák feladata az elektromos töltések továbbítása és a munkadarab kívánt alakúra történő erodálása. A különböző elektróda anyagok nagymértékben befolyásolják a megmunkálást. Egyesek hatékonyan távolítják el az anyagot, de közben nagy a kopásuk, más elektróda anyagok pedig csekély kopási tulajdonságokkal rendelkeznek, ugyanakkor lassan távolítják el az anyagot. Ezek alapján a szerszámelektrodák anyagainak fő tulajdonságai, melyek leginkább befolyásolják a szikraforgácsolási folyamatot a következők [8]:

- elektromos vezetőképesség
- olvadáspont
- szerkezeti integritás – az anyag mennyire reagál jól a felületén keletkező több százezer szikrára
- mechanikai tulajdonságok – főként a szakítószilárdság, szemcseméret (ha van ilyen) és a keménység
- gyárthatóság – megmunkálhatóság, stabilitás, sorjaképződés és eltávolítás
- költségek

Elmondható, hogy a jó elektromos és hővezető képességgel, továbbá a magas olvadásponttal rendelkező, könnyen megmunkálható szerszámanyagokból készülnek az ideális szikraforgácsoló elektródák. Az elektródák gyakori anyagai közé tartozik a sárgaréz, a vörösréz, a grafit, a rézgrafit, a tellúr-réz, a volfrám, a volfrám-réz, a volfrám-karbid, az ezüst, a volfrám-ezüst és az alumínium. [8] Kutatásom során, a próbadarabok szikraforgácsolása – az iparban leggyakrabban használt – vörösréz és grafit elektródákkal történt, ezért a következőkben ezt a két szerszámanyagot ismertetem részletesebben.

A réz (vörösréz), jó elektromos és hővezető képességének köszönhetően az egyik leggyakrabban használt elektróda anyag. Jó szerkezeti integritással rendelkezik, ennél fogva igen finom felületminőségek létrehozására képes. Hátrányaként említhető meg például a nagy térfogatátulása, ami megnehezíti az eróziós termékek kiöblítését a munkatérből. Ezen kívül alacsony olvadásponttal rendelkezik, melynek következtében gyorsan kopik. A réz mivel képlékeny anyag, ezért nehezen munkálható meg és sorja mentesítése is nehézkes. Tellúrral való ötvözése javítja a megmunkálhatóságát, ugyanakkor tovább növeli a kopását és csökkenti az anyagleválasztási sebességét a tiszta rézhez képest. Ennek ellenére a rezet számos területen előszeretettel alkalmazzák, így például a fémek, kerámiák és kompozitok szikraforgácsolásában is. [8]

A grafit, a második leggyakrabban alkalmazott elektróda anyag a szikraforgácsolás területén, köszönhetően annak, hogy könnyen megmunkálható és rendkívül kedvező elektromos és hővezetési tulajdonságokkal rendelkezik. A rézzel ellentétben, a grafitnak magas az olvadáspontja, emiatt nagymértékben kopásálló. Mechanikai szilárdsága alacsonyabb a fémes elektróda anyagokkal szemben, viszont mivel a szikraforgácsolás igen kicsi erőhatásokkal jár, ezért ez a jellemzője kevésbé releváns. A grafit egyedi tulajdonságai közé sorolható: a szemcseméret (az alacsonyabb szemcseméret javítja a mechanikai tulajdonságait, ami kedvezőbb elektródakopást és jó előállítható felületminőséget eredményez), a porozitás (befolyásolhatja az elektromos és termikus tulajdonságait), a hajlítósilárdság és a keménység. Előnyeként említhető meg a rézzel szemben, hogy könnyebben és gyorsabban munkálható meg, továbbá (a grafit szerkezetétől függően) hasonlóan jó felületminőségek érhetők el vele. Hátránya azonban, hogy megmunkálása során a grafit port termel, ami nem megfelelő szabályozás mellett, hosszútávon károsíthatja a szerszámgép alkatrészeit. [8]

2.4. A folyamat technológiai jellemzői és teljesítménymutatói

A szikraforgácsolási folyamatot jellemző paramétereket alapvetően két csoportba sorolhatjuk. Ezek alapján beszélhetünk elektromos és nem elektromos paraméterekről. [9]

A legjelentősebb elektromos paraméterek a következők [1] [5] [9]:

- kisülési feszültség: a folyamat során, a munkadarab és a szerszámelektroda között fellépő egyenfeszültség
- csúcsáramerősség: a szikraforgácsolás során felhasznált teljesítmény, mely a legnagyobb befolyást gyakorolja a folyamatra
- közepes áramerősség: minden impulzus esetén rendelkezésre álló áramerősség
- impulzusidő: a szikrakisülés időtartama, másnéven bekapcsolt állapot vagy ON time
- szünetidő: az egyes szikrakisülések közötti rövid szünet, másnéven kikapcsolt állapot vagy OFF time
- ciklusidő: az impulzusidő és a szünetidő összege, az egyik impulzus kezdetétől a következő impulzus kezdetéig tartó idő
- polaritás: a megmunkálási cél függvényében az elektróda polaritása egyaránt lehet pozitív és negatív. Pozitív szerszám polaritás mellett nagyobb anyagleválasztási sebesség érhető el
- szikraköz: a szikraforgácsolási folyamat során, a szerszám és a munkadarab közötti átütési távolság. Állandó értéken tartását előtolómű biztosítja

A folyamat főbb nem elektromos paraméterei [1] [9] [10]:

- munkadarab anyaga: a teljesítménymutatók egyik befolyásoló tényezője a nem elektromos paraméterek közül. Szikraforgácsolással minden olyan rendkívül kemény anyag megmunkálható, amit hagyományos módszerekkel egyáltalán nem vagy igen nehezen tudnánk megmunkálni
- szerszámelektroda anyaga: megválasztásának szempontjai a vezetőképesség, az olvadáspont és a megmunkálhatóság. 11 elektróda anyagot különböztetünk meg, melyek közül a vörösrezet és a grafitot alkalmazzák leggyakrabban
- elektróda formája: nagyban befolyásolja a teljesítménymutatókat, számos elektródaforma használatos (pl. téglalap, négyzet, hatszögletű, hengeres, stb.)
- elektróda forgatása: javítja a szikraköz átöblítési viszonyait és a hőmérséklet eloszlást, ami növeli az anyageltávolítási sebességet és jobb felületminőséget eredményez
- dielektrikum típusa: szigetelőként funkcionál, ugyanakkor részt vesz a kisülési folyamatban is. Ezen kívül hűti a munkateret és annak környezetét, valamint kiöblíti onnan a leválasztott anyagrészecskéket. Az optimális dielektrikum megválasztását a konkrét megmunkálás követelményei határozzák meg
- öblítés és az öblítőnyomás: az erodált részecskék nagyban ronthatják a szikraforgácsolás hatékonyságát ezért szükséges az elektródaköz öblítéssel történő mesterséges tisztítása. Az öblítőnyomásnak köszönhetően a munkadarab és a szerszám hűtése kedvezőbb, befolyásolja továbbá az előállított felület érdességét, a szerszámkopás mértékét és az anyagleválasztási teljesítményt is

A felsorolt folyamatjellemzők nagymértékben befolyásolják a szikraforgácsolás teljesítményét. Éppen ezért, ma már számos kutatás foglalkozik ezen paraméterek optimalizálásával a szikrázási folyamat minél jobb teljesítménymutatóinak elérése érdekében. A megmunkálási folyamat hatékonyságát az anyagleválasztási sebesség, az elektródakopás, az elektródaközök mérete, a felületi érdesség és a szikraforgácsolt felület szerkezete révén értékelik. Ezeket a jellemzőket tekintjük a folyamat minőségi és költség befolyásoló mutatóinak.

Az anyagleválasztási sebesség vagy teljesítmény a munkadarabból időegység alatt leválasztott anyagmennyiség. Jelölése V_w vagy MRR (Material Removal Rate), értékét mm^3/min egységben mérjük. A munkadarab megmunkálásának sebességét fejezi ki, mely közvetlenül összefügg a termelékenységgel. Meghatározása során, a munkadarab megmunkálás előtti és utáni tömegének vagy térfogatának különbségét osztjuk el az anyagleválasztás idejével (1. egyenlet). Az anyagleválasztási teljesítmény értéke függ az áramerősségtől, a frekvenciától, a munkafolyadéktól, az öblítéstől, valamint a szerszámelektroda és a munkadarab anyagától. [1] [11]

$$V_w = \frac{\text{Megmunkálás előtti munkadarab tömeg} - \text{Megmunkálás utáni munkadarab tömeg}}{\text{Megmunkálási idő}} \quad (1)$$

Szikraforgácsoláskor nem csak a munkadarabról, hanem a szerszámelektrodáról is leválik anyag. Ez káros, mert csökkenti a megmunkálás pontosságát. Az elektródakopás alatt az elektróda időegységre vonatkoztatott elhasználódását értjük. Jelölése V_E , TWR (Tool Wear Rate) vagy EWR (Electrode Wear Rate), mértékegysége ugyancsak mm^3/min . Értékét – az anyagleválasztási sebességhez hasonlóan – az elektróda megmunkálás előtti és után tömegéből vagy térfogatából, valamint a megmunkálási időből határozzuk meg (2. egyenlet). [1]

$$V_E = \frac{\text{Megmunkálás előtti elektróda tömeg} - \text{Megmunkálás utáni elektróda tömeg}}{\text{Megmunkálási idő}} \quad (2)$$

Az elektródakopás ma már nem használatos jellemző. Helyette a ϑ fajlagos elektródakopást használjuk, ami a V_E elektródakopás és V_w anyagleválasztási sebesség hányadosa százalékban kifejezve [1] [7]:

$$\vartheta = \frac{V_E}{V_w} \cdot 100\% \quad (3)$$

Az elektróda legjobban az éleken kopik, ez a sarok- vagy élhatás következménye: az éleknek, sarkoknak nagyobb anyagmennyiséget kell leforgácsolniuk. A kopás értéke függ az áramerősségtől, a frekvenciától, a munkafolyadéktól, a szerszámelektroda és a munkadarab anyagától, valamint az öblítéstől. Az elektródakopás rontja a megmunkálás pontosságát, mert a szikraforgácsolással a kopott szerszámelektroda leképezése jön létre. [1]

Szikraforgácsolás során, a megmunkálás abban a pillanatban kezdődik, amikor a szerszámelektroda szikraköznnyire közelíti meg a munkadarabot. Az elektróda

homlokfelülete és a munkadarab közötti rést homlokköznek nevezzük, a kisülés itt fog létrejönni. Mérete a munkafolyadék szigetelési szilárdságától, a generátor kapocsfeszültségétől és az öblítéstől függ. A szerszámelektroda munkadarabba való behatolása során azonban nemcsak a homlokfelületen, hanem az oldalfelületen is létrejönnek kisülések. Az elektroda oldalfelülete és a munkadarab közötti távolságot oldalköznek (oldalszikraköznek) nevezzük. Az oldalköz nagyobb a homlokköznel. Mérete nem egyenletes, hanem a levált részecskék eltávozása irányában (esetünkben felfelé) nő. Értéke elsősorban a kisülési feszültségtől és frekvenciától, a használt munkafolyadéktól függ, de jelentősen befolyásolja a szikraköz öblítése is. A homlokközt és az oldalközt szokás közösen elektrodaköznek nevezni, ami szintén a szikraforgácsolás egyik teljesítménymutatója. [1]

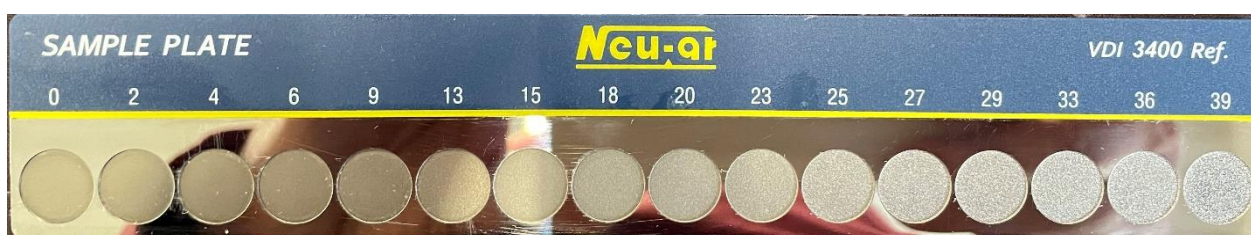
2.5. VDI fokozat

A szikraforgácsolás megjelenését követően, a növekvő ipari igény miatt, maga a technológiai folyamat egyre több problémába ütközött. A 2.4. fejezetben felsorolt elektromos paraméterek alapján elmondható, hogy a szikraforgácsolási folyamat, hatékonysága számos tényező függvénye. Ezeket a technológiai paramétereket, a régi típusú szerszámgépeken – a megmunkálás kezdete előtt – a gépkezelő feladata volt beállítani. Azonban a paraméterek megfelelő megválasztása, a szikraforgácsoló megmunkálás stratégiájának kidolgozása a kívánt felületi érdesség elérése érdekében nagyfokú szakértelmet követelt meg. Ehhez egyrészt nehéz volt megfelelő szakembert találni, másrészt a megmunkálási folyamatot lassította a stratégia kidolgozása, majd az adatok szerszámgépbe való betáplálása. Nehézséget jelentett továbbá az is, hogy világszerte, gyáranként más-más szikraforgácsoló berendezés állt a rendelkezésre és a különböző gépek, eltérő technológiai adatok mellett tudták ugyanazt a kívánt felületminőséget létrehozni. A megmunkálást követő felületi érdességmérés pedig tovább bonyolította a technológiai folyamatot, hiszen a mérőberendezés plusz költséget, további szakértelmet, maga a mérés pedig többletidőt vont maga után.

A gyorsan fejlődő ipar követelményei miatt, szükségessé vált ezen problémák mihamarabbi kiküszöbölése, a szikraforgácsolási technológia egységesítése. A szikraforgácsolási folyamat egyszerűsítésére, standardizálására a VDI tett jelentős intézkedéseket 1975-ben. A VDI (Verein Deutscher Ingenieure) a Német Mérnöki Kamara rövidítése. Ez a szervezet szabvány jellegű műszaki ajánlásokat dolgoz ki a különböző műszaki folyamatok és problémák megoldásának elősegítésére. [12] A szikraforgácsolási technológia standardizálását a VDI 3400-as [13] szabványukban foglalták össze. A szikraforgácsoló megmunkálásról elmondható, hogy egy sztochasztikus folyamat, a szikrakisülések révén létrehozott felületen, a fémrészecskék kiválásának helye teljesen véletlenszerű. Ennek a strukturált felületnek a jellemzésére, a VDI – az említett számú szabványuk szerint – a szikraforgácsolással megmunkált felületeket úgynevezett VDI fokozattal számszerűsíti. Ez a paraméter egyfajta felület érdességi jellemző és az általános felületi érdességi mérőszámokat (R_a , R_z , R_t , stb.) egészíti ki. [12] A 3400-as szabvány a strukturált felületminőséget osztályokba, csoportokba sorolja VDI 00-ás értéktől a VDI 45-ös értékig. Az adott VDI csoportnak megfelelő átlagos érdesség (R_a) értéket táblázatokból határozhatjuk meg vagy az alábbi képletből számítható [14]:

$$\text{VDI osztály} = 20 \cdot \lg(10 \cdot R_a) \quad (4)$$

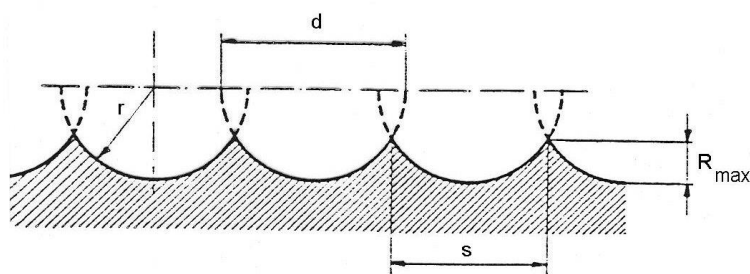
A számítástechnika és az automatizálás folyamatos fejlődése a szikraforgácsoló szerszámgépek modernizálására is kiterjedt. A mai korszerű gépeknek köszönhetően a technológiai folyamat tervezése kevesebb szakértelmet igényel, a gépkezelő feladata nagyban leegyszerűsödött, hatásköre szűkült, hiszen már elég csak a megmunkálás főbb jellemzőit beállítani, az elektromos paramétereket ezt követően a gép magának generálja és állítja az optimális értékre. Jellemzően ezek az alapadatok a munkadarab anyaga, a szikrázási mélység, a szikrázott felület területe, a szikraköz értéke, az elektróda anyaga és darabszáma, valamint az elérni kívánt felületminőség. A technológiai paraméterek optimalizálása szempontjából a megmunkálási folyamat fő befolyásoló tényezője a kívánt felületminőség, tehát a választott VDI fokozat. Ezt megadva, a gép az értékére alapként tekint, ehhez állítja be a megmunkálás összes technológiai jellemzőjét, ami gépkonstrukciónként eltérő. A VDI skála ma már világszerte alkalmazott az iparban. Beállításának megkönnyítésére, minden szikraforgácsoló szerszámgépgyártó sablonokat biztosít etalonként (3. ábra). Ezen az egyes lenyomatoknak köszönhetően a fokozatok közötti különbségek tapinthatók és vizuálisan nyomon követhetők, valamint az elkészült, szikraforgácsoló felületek ellenőrzésére is szolgál. Ezzel az érdességmérő gépen való ellenőrzés ideje és költsége is megspórolható.



3. ábra VDI sablon

2.6. A szikraforgácsoló felület érdessége és szerkezete

A szikraforgácsoló felület jellegében eltér a hagyományos forgácsolással megmunkált felülettől. Nem jelentkezik az előtolásnak megfelelő irányítottság, barázdáltság, a szikraforgácsoló felület felnagyítva kráteres. Elméletileg a felület érdessége a 4. ábra szerint alakul, a valóságban azonban, az egymást átfedő kráterek elhelyezkedése az 5. ábrának megfelelően szabálytalan, egyenetlen. A kisülési csatorna talppontjaiban a munkadarab anyaga megolvad, az ömledék a kisülési csatorna összeomlásakor javarészt kicsapódik a szikraközbe, ott lehül és megszilárdul, kisebbik része azonban visszamarad a kráterben. A kráterek méretei a szikrakisülés jellemzőitől, a munkadarab és az elektróda anyagától, valamint az öblítéstől függ. A kráter mélységének és átmérőjének aránya $1/5 \dots 1/50$. [1]



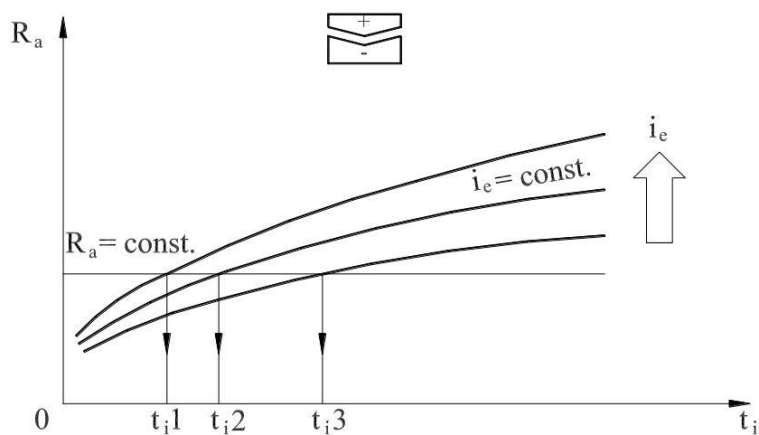
4. ábra A felületi érdesség elméleti alakulása [15]

r – elemi kráter sugara; d – eredeti felületen kialakuló kráterátmérő;
 s – kész felületen mérhető kráterátmérő; $R_{\max}$ – maximális felületi érdesség



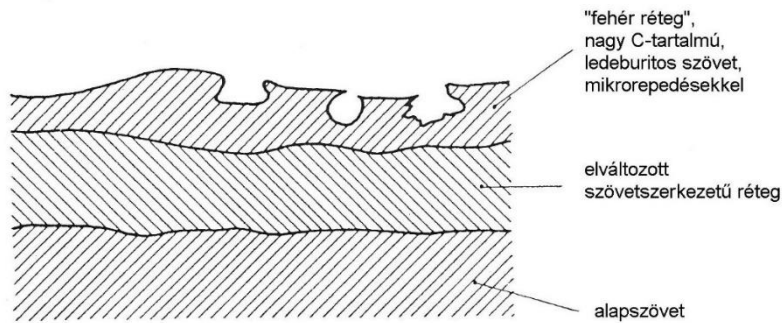
5. ábra A szikraforgácsolt felületminőség valós alakulása [12]

Minél nagyobb a kisülés energiataralma és időtartama, ez az arány annál kisebb (sekély kráter), mert a kisülési csatorna szélesedik. Az ilyen felület foltosan fényes. A rövid ideig tartó nagy energiájú kisülések mély krátereket hoznak létre, mert nincs elég idő a keletkezett hő elvezetésére. Az ilyen felület homogénnek tűnik, selymes, tompa fényű. [1] A kisülések energiataralmát az elektromos paraméterek változtatásával lehet szabályozni. Az elektromos paraméterek közül az áramerősség és az impulzusidő gyakorolja a legnagyobb hatást a felületi érdességre. Ezek kapcsolata a 6. ábrán látható.



6. ábra A felületi érdesség kapcsolata a szikraforgácsolás áramerősségével és impulzusidejével [7]

A szikraforgácsolt felületi rétegben a kisülések hőhatására változások következnek be. Ezek a réteg mikroszerkezete, keménysége, feszültségi állapota és vegyi összetétele módosulásában nyilvánulnak meg. [7] Az acélok szikraforgácsolása során keletkező felület három különböző tulajdonságú rétegből épül fel (7. ábra).



7. ábra A szikraforgácsolt felület szerkezeti felépítése [15]

A legfelső réteg az úgynevezett „fehér réteg”, mely nevét fehér színéről kapta. Ez a kisülés végén a kráterben maradó megolvadt, majd újraszilárdult anyag. A munkadarab tömegének gyors hőelvonása következtében legutoljára ez a réteg szilárdul meg, ezért a felső rétegben húzó-, az alatta levőben nyomófeszültség ébred. A gyors lehűlés miatt a szén nem grafit, hanem a kezdeti cementkiválás után vas-szén eutektikum, ledeburit keletkezik, és mintegy 0,4% gázzárvány marad az anyagban. Ez a réteg a dielektrikum bomlástermékeivel, valamint az elektróda anyagával is vegyi reakcióba lép, szénnel telítődik, vaskarbid és egyéb fémkarbidok keletkeznek. A munkadarab élettartamának növelése érdekében, ezt a hibás réteget abrazív megmunkálással (polírozással vagy csiszolással) eltávolítják vagy a dielektrikumba adagolt segédanyagporok (Al, Si, C, 1-100 μm) segítségével felületileg ötvözik, tükörszerű szikraforgácsolt felületet hozva létre (kevés mikrorepedés). Ha a szikrázott felület struktúrájának a kész darabon meg kell jelennie, a réteg nem távolítható el, ilyenkor feszültségmentesítő hőkezelést kell végezni. [1] [16]

A fehér réteg alatt elhelyezkedő kilagyult réteg a hűlési sebességek és az anyag tulajdonságainak megfelelően elváltozott szövetszerkezetű. Főleg a martenzit bomlásából képződött fázisváltozatokból áll, de tartalmaz maradék ausztenitet is. Az elváltozott szövetszerkezetű réteg a fehér rétegnél általában vékonyabb, itt jelentős nyomófeszültség lép fel. Ezen két réteget együttesen károsodott rétegnek nevezzük. [1] [5] [15]

A felület legalsó rétege a változatlan szövetszerkezetű alapanyag vagy alapszövet. A rétegek vastagsága főleg a kisülések energiatartalmától és időtartamától, illetve az azt meghatározó villamos jellemzőktől függ. [15]

3. A felület érdességi paramétereinek ismertetése

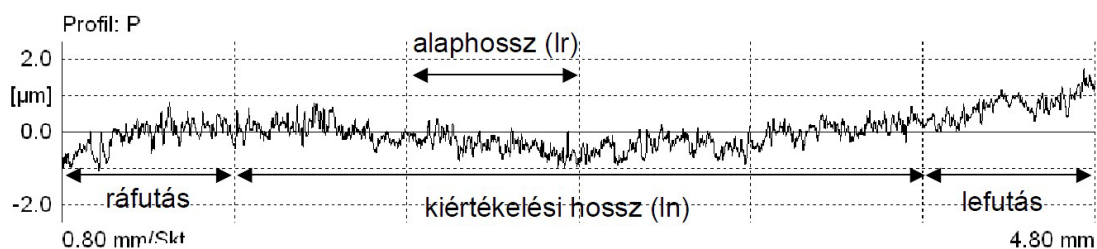
Kutatásom egyik alapját, a tömbelektródás szikraforgácsolással készített felületek különböző mikrogeometriai jellemzői, a felületek minőségének tanulmányozása adja. A kiértékelések tisztább átláthatósága érdekében jelen fejezetben áttekintem a felületi mikrogeometria elméleti hátterét, valamint a mikrogeometriát jellemző 2D-s és 3D-s paramétereket, mérőszámokat.

3.1. A felületi mikrogeometria jellemzői

Egy szilárd test felülete a testnek az a része, amelyik határt képez a test és környezete között. A felület, mint fizikai valóság számos lényeges és jellemző tulajdonsággal bír, melyek egyike a geometriai tulajdonságok összessége. A működési viselkedés szempontjából vizsgálat tárgyává tett felületrész többnyire a teljes felületnek csak töredéke, így ezt összességében mikrogeometria néven ismeri a szakirodalom. [17]

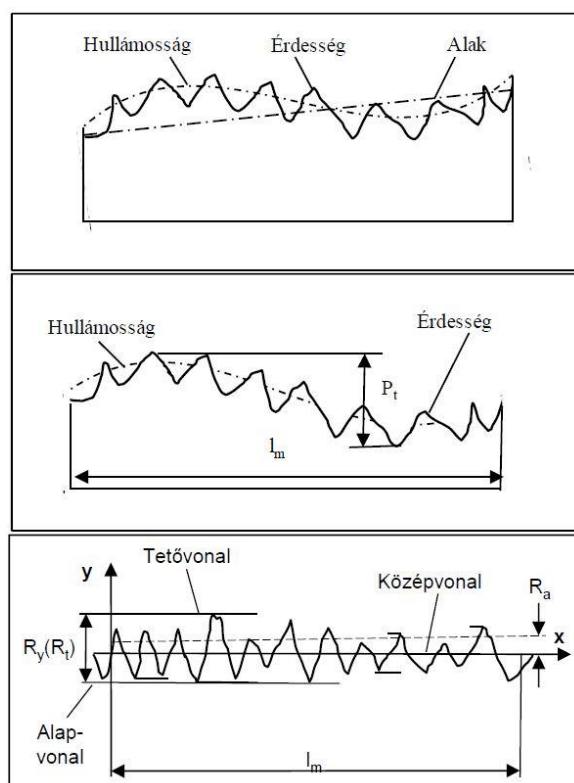
A működő felületek mikrogeometriai jellemzése a gyakorlati mérés technikában döntően két dimenzióban valósul meg. A műszaki gyakorlatban előszeretettel alkalmazzák a síkbeli (2D-s) mérést, hiszen többnyire szabványosított, tehát mérőszámaik széles körben elfogadottak és ismertek. További előnyei közé tartozik, hogy mérőműszerei relatíve olcsók, hordozhatók és gyors mérést tesznek lehetővé.

A 2D-s profil mérések menete a következőképpen zajlik. A műszerek által regisztrált x-z digitális adathalmaz (D-profil) még tartalmazza a vizsgált darab ferdeségét a vontatóegységhez képest, esetleges függőleges (z) irányú elcsúszását a mérőgép 0 magasságkoordinátájához viszonyítva. Mindezek kiszűrésére elsőként egy középvonalra fektetés történik meg, melyet legtöbbször a mért adathalmazra a legkisebb négyzetek módszerével illesztett egyenes valósít meg. Az ily módon rendezett adathalmazt P profilnak nevezzük (8. ábra). [17]



8. ábra A szűretlen P profil alapelemei [17]

A szűretlen profilnak is nevezett P profil már alkalmas a további kiértékelésre, de a kiértékelés következő lépésében megtörténik a hullámossági (W) profil meghatározása, szűrése. A P és W profilok különbsége adja a gyakorlatban közkezdvelten használt érdességi (R) profilt (9. ábra). [17]



9. ábra A szűretlen P profil alapelemei [17]

A mérési hossz alapeleme az ún. alaphossz (l_r). A tényleges mérési hossz 3 szakaszból tevődik össze: ráfutás, kiértékelési hossz és lefutás (8. ábra), ahol a rá- és lefutás megegyezik az alaphosszal, míg a kiértékelési hossz (l_n) az alaphossz többszöröse. Ha lehetőség van rá célszerű betartani az $l_n=5l_r$ hosszt, de olyan esetben, amikor a mérendő felület nagysága nem teszi lehetővé ezt, a rövidebb kiértékelési hossz is szabványos mérésnek tekinthető. [17]

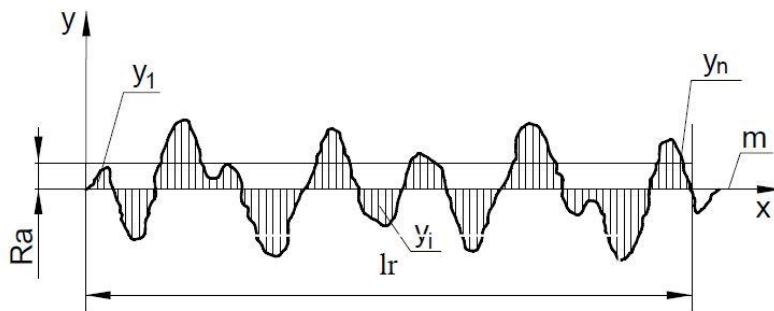
3.2. A felület mikrojeometriáját jellemző paraméterek

A felület mikrojeometriai jellemzőit az irodalom az alábbi fő csoportokba osztja: amplitúdó (magassági vagy mélységi) paraméterek, térköz (profil- vagy hosszirányú) paraméterek, valamint különböző funkcionális, anyaghányad és hibrid paraméterek. A továbbiakban ezek közül a dolgozatomban kiértékelésének alapjául szolgáló jellegzetes mérőszámokat részletezem.

3.2.1. Amplitúdó paraméterek

Az **átlagos érdesség (R_a)** a legismertebb érdességi paraméterek egyike (10. ábra). Alapvetően a felület magasságirányú jellemzését szolgálja. [17] Matematikai definíciója:

$$R_a = \frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |z(x)| dx \quad (5)$$

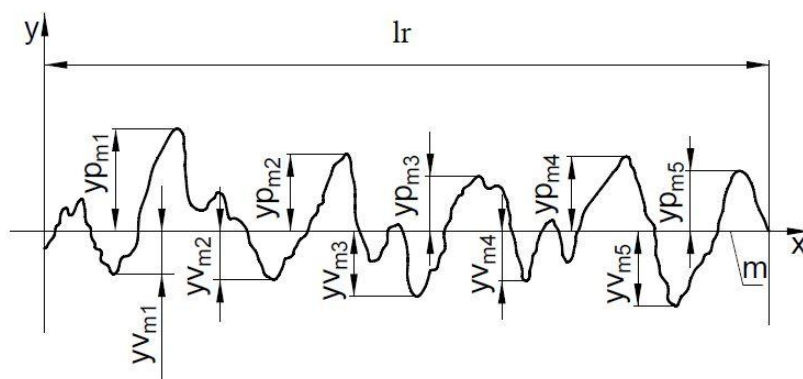


10. ábra Az átlagos érdesség meghatározása [17]

Gyártástechnológiai folyamatok jellemzésére, a megmunkált felület minősítésére jól használható paraméter: változása a felület előállítása során valamilyen technológiai paraméter (pl.: szerszám forgácsoló élének kopása) utal. Fontos azonban látni, hogy az R_a paraméter definíciója szerint nem tesz különbséget a völgy és a csúcszóna között, ezért a felület működésében betöltött szerepéről nem ad pontos tájékoztatást. Különböző technológiával készült felületek esetén előfordulhat azonos átlagos érdességi érték, de a két felület rendelkezhet egymástól teljesen eltérő működési tulajdonságokkal. Sajnos az R_a paraméter nem hordozza a profil hosszirányú információit sem, nem ad felvilágosítást a profil középvonal körüli eloszlásáról, pedig ezek komolyan befolyásolják az érintkezési, súrlódási, kopási, kenési, hővezetési, stb. viszonyokat. [17]

Az **egyenetlenség magasság (R_z)**, más néven közepes érdességmélység, az 5 legmagasabb érdességi csúcs és az 5 legmélyebb érdesség völgy közötti távolság átlaga (11. ábra). [17] Matematikai definíciója:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{p_{mi}}| + \sum_{i=1}^5 |y_{v_{mi}}|}{5} \quad (6)$$



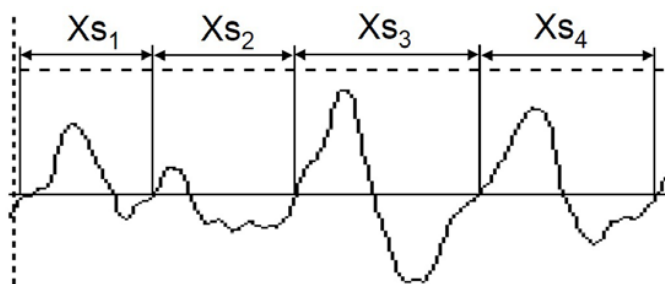
11. ábra Az egyenetlenség magasság meghatározása [17]

3.2.2. Térköz paraméterek

A profilmenti vagy térköz paraméterek közül legszélesebb körben az **egyenetlenségek közepes hullámhossza (R_{Sm})** paramétert használják (12. ábra). [17] Definíciója:

$$R_{Sm} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m X_{si} \quad (7)$$

Az X_{si} értékek a profil és a középvonal olyan két metszéspontjának a távolsága, melyek között a profilnak csak egy kiemelkedése és egy bemélyedése található. [17]



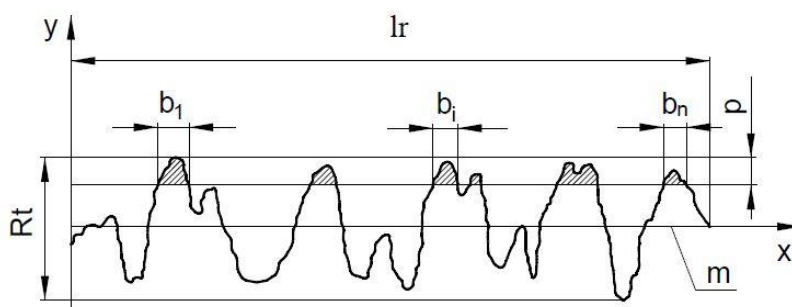
12. ábra Az egyenetlenségek közepes hullámhosszának meghatározása [17]

Profilelemként megkülönböztetünk érdesség csúcsokat és völgyeket. Profilelem a középvonal és a profil két egymást követő metszéspontja közötti, a profil és középvonal által határolt terület. Érdességcsúcsok a középvonal feletti, míg völgyek a középvonal alatti részek. Az R_{sm} paraméter periodikus profil esetén alkalmas a jellemző hullámhossz meghatározására (pl.: esztergált felület esetén R_{sm} mutatja az előtolást). Ennek a műszaki gyakorlatban kiemelt szerepe van, hiszen a működés során a profil periodicitása rezgésforrásként működhet. Ezt napjainkban egyre inkább figyelembe veszik a tervezés során. [17]

3.2.3. Anyaghányad és funkcionális paraméterek

A funkcionális paraméterek egyik első paramétere az anyaghányad (vagy hordozóhossz) arány (R_{mr}) volt (13. ábra). [17] Definíciója:

$$R_{mr(p)} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{l_r} [\%] \quad (8)$$

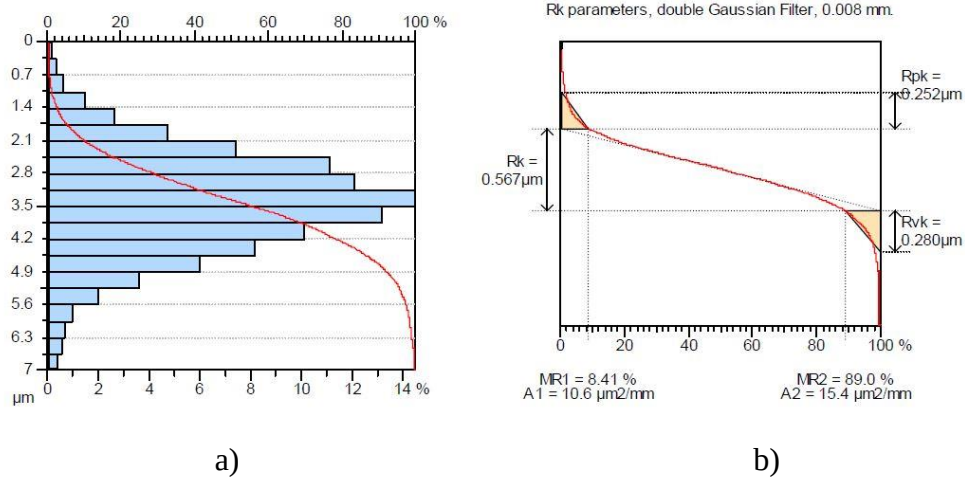


13. ábra Az anyaghányad (vagy hordozóhossz) arány meghatározása [17]

Az anyaghányad arány a felület tetejétől adott (c) mélységben (13. ábra) elmetszett anyagszékek aránya a kiértékelési hosszhoz viszonyítva. [17] Százalékos érték, adott felület mérése során minél nagyobb értékeket kapunk R_{mr} -re, a felület annál jobb működési tulajdonsággal rendelkezik.

Hordozóhossz vagy anyaghányad görbének nevezzük a mért profil tetejétől számított különböző mélységekben képzett anyagszékek és a vizsgált hossz százalékban kifejezett

arányát. A 14. ábra piros görbéi jellegzetes anyaghányad görbéket mutatnak. A 14. a) ábrán az ún. magasságeloszlás görbe is fel van tüntetve, melyből az anyaghányad görbe tulajdonképpen származtatható. Az érdességmérési topográfia kezelhetők egy adathalmazként, melyről azok sűrűségfüggvénye (érdességmérésnél magasságeloszlás), illetve a sűrűségfüggvény integráljaként értelmezhető eloszlásfüggvény (érdességmérésnél hordozófelület görbe) fontos információkat közvetít. Az anyaghányad görbéket Abbott-Firestone görbéknek is nevezik. [17]



14. ábra Anyaghányad görbe (Abbott-Firestone görbe) értelmezése [17]

A hordozófelületi görbe függőleges tengelyén a skála 0-tól R_t (maximális egyenetlenség) értékig terjed, míg vízszintesen 0-100% tartományon értelmezett (ld.: 14. ábra). A magasságeloszlás szintén a teljes profilmagasságot felöleli, de a vízszintes tengelyen a maximum minden esetben kisebb, mint 100% (általában 5-20%). [17]

A **ferdeségi mérőszám (R_{sk})** (profil aszimmetria, skewness) paraméter a profil magasságeloszlás függvényének alakját, a középvonalhoz viszonyított aszimmetriáját jellemzi. [17] Definíciója:

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \cdot \left(\frac{1}{l_r} \right) \cdot \int_0^{l_r} |Z^3(x)| dx \quad (9)$$

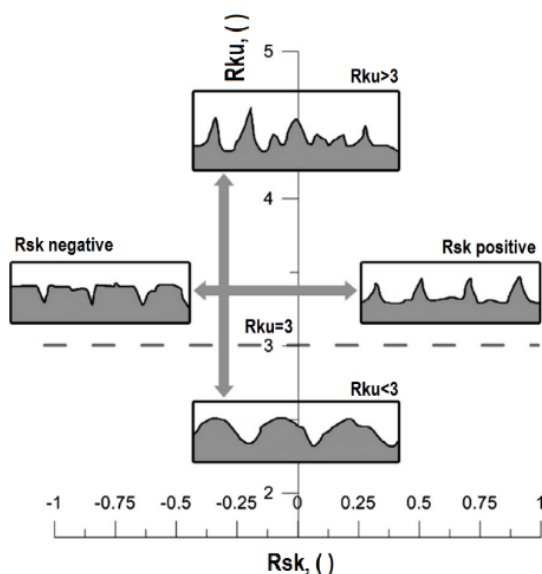
Úgynevezett gaussi felületeknél – ahol az egyes profilpontok magasságeloszlásának függvénygörbéje szimmetrikus – R_{sk} értéke nulla. R_{sk} negatív, ha a magasságeloszlás görbének hosszabb része jelenik meg a középsík feletti oldalon, és pozitív a fordított esetben (15. ábra). A negatív skewness értékek azt jelzik, hogy a megmunkált felületi textúra jó teherviselő képességű és kopásállóbb. Ez a paraméter nagyon fontos műszaki és gyakorlati jelentést hordoz a valós működő felületekről. [17] [18]

A **lapultsági mérőszám (R_{ku})** (kurtosis) a magasságeloszlás csúcsosságát, hegyességét, tehát szórását (szórássterjedelmét) jellemzi. [17] Definíciója:

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \cdot \left(\frac{1}{l_r} \right) \cdot \int_0^{l_r} Z^4(x) dx \quad (10)$$

A már említett gaussi felületeknél $R_{ku} = 3$ értékű. Nagy R_{ku} érték többnyire kiugró csúcsokra vagy völgyekre (esetleg mindkettőre) utal (15. ábra). Ha $R_{ku} > 3$, az egymáson elcsúszó felületeket intenzív kopás jellemzi majd. Ha $R_{ku} < 3$, a felületi egyenetlenségek

eloszlása sokkal kedvezőbb. Ekkor a felület jellegére az mondható el, hogy telt profilú. [17] [18]



15. ábra R_{sk} és R_{ku} értelmezése [19]

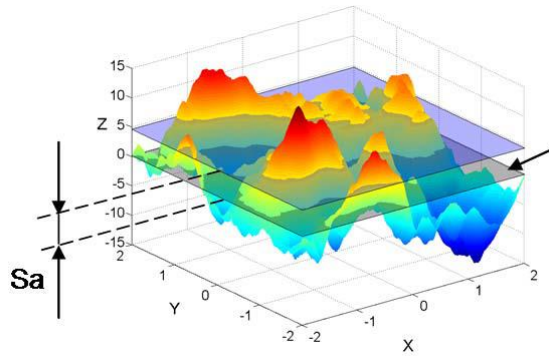
3.3. A felületi mikrogeometria topográfiai (3D) jellemzői

A 3D-s (topográfiai) mérések kialakulását az informatika fejlődése tette lehetővé. A legtöbb műszaki felület nem hozható létre csupán egyetlen profil kihúzásával. Ennek pedig komoly működésbeli jelentősége van, ezért szükséges a 3D-s jellemzés. A mikrotopográfiai paraméterekkel történő jellemzés a felület térbeli egyenetlenségeinek lényegesen valósághűbb feltárását, kiértékelését teszi lehetővé. Vizuális információt is szolgáltat, ezáltal könnyen értelmezhető. Napjainkra a topográfiai mérések és kiértékelés területén számos előrelépés történt széleskörű ipari alkalmazása még várat magára. Ennek oka főként, hogy mérőszámok a műszaki gyakorlatban még nem elterjedtek, értékelésük a gyakorlat számára tapasztalat híján olykor nehézkes, ezen kívül mérőműszerei költségesek, mérőszobai környezetet és fokozott hozzáértést igényelnek, valamint a nagy mennyiségű adat miatt a mérés és kiértékelés nagyon időigényes. [17]

A felületi mikrotopográfia lényegesen több információt hordoznak, mint az egyszerű profilmérések. A vonatkozó szabványok számtalan paramétert definiálnak. Ezen paraméterek egy része mindössze a 2D-ből jól ismert paraméterek 3D-be történő átvitelével származik (pl: S_a , S_z , S_v , S_{sk} , S_{ku} , S_q , S_k , S_{pk} , S_{vk} , S_{mr}). Az „S” jelölés a surface – felület – jellegre utal, az utána következő karakterek értelmezése pedig megegyezik a 2D-ben ismertekkel. [17] Jelen fejezetben – akárcsak a 2D-s paraméterek esetén – a kísérleti kiértékelésemhez releváns paramétereket fogom részletezni.

A **térbeli átlagos érdesség (S_a)** (16. ábra), mely a felület közepsíktól való eltérések számtani középértéke. [17] Matematikai kifejezése:

$$S_a = \frac{1}{A} \cdot \iint_A |z(x,y)| \, dx dy \quad (11)$$

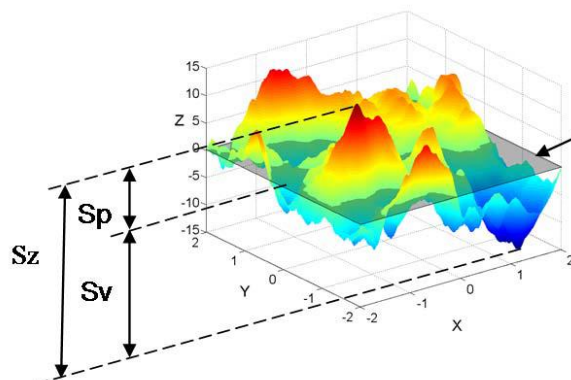


16. ábra A térbeli átlagos érdesség (S_a) értelmezése [17]

Megfelel a kétdimenziós R_a -nak. Lényegében a mintavételi felület középsíktól számított eltérései abszolútértékének számtani középértéke. [17]

A **felület egyenetlenség magassága (S_z)** (tízpont-magassága) (17. ábra) szélsőértéket jelentő paraméternek tekinthető. Kétdimenziós megfelelője az R_z . [17] Meghatározása:

$$S_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |\eta_{pi}| + \sum_{j=1}^5 |\eta_{vj}|}{5} \quad (12)$$



17. ábra A felületi egyenetlenség magasság (S_z) értelmezése [17]

Ahol η_{pi} és η_{vi} ($i = 1, 2, \dots, 5$) az öt legmagasabb csúcs, illetve az öt legmélyebb völgy magassága, illetve mélysége a sík középsíktól mérve. A csúcs (illetve a völgy) definíciója nem olyan egyértelmű, mint kétdimenziós esetben. Több kritérium alapján történhet a pontok kiválasztása, de a legkézenfekvőbbnek a „nyolcpont-feltétel” látszik. E szerint adott pont csúcspontnak tekinthető, ha magasabb, mint nyolc leközelebbi szomszédja. [17]

A funkcionális felületek közül a topográfiai vizsgálatnál szokás értelmezni az **anyagterfogati hányadot (S_{mr})**, melyet a felület csúcsától adott mélységben értelmezünk. [17] Kétdimenziós megfelelője az R_{mr} .

4. Kísérleti körülmények

Jelen fejezetben a kutatási céljaim megvalósítása érdekében készített szikraforgácsolási kísérletek körülményeinek taglalásáról lesz szó. Ismertetem a kísérletek során alkalmazott szerszámgépet, a megmunkált anyagok és használt szerszámelektrodák sajátosságait, valamint a mérések kivitelezése során használt mérőberendezés és mérőeszköz jellemzőit. Végezetül kifejtem a kísérlet és a mérések megvalósításának körülményeit. Bemutatom a megmunkálás technológiai paramétereit, az elkészült próbadarabokat, a mérések kivitelezését és a mérési helyeket.

4.1. A kísérletek megvalósításához használt szerszámgép

A vizsgálataim elvégzéséhez szükséges megmunkálási kísérleteket a bátonyterenyi székhelyű Viessmann Modellgyártó Kft. szerszámműhelyében végeztem egy Neuar CNC-C50 típusú tömbös szikraforgácsoló gépen (18. ábra). A megmunkálás során, a munkadarabok befogása satuban történt, az alkalmazott dielektrikum petróleum volt.



18. ábra Neuar CNC-C50 tömbelektrodás szikraforgácsoló gép

A gép fontosabb műszaki adatai a következők:

- Méretei (H x Sz x M): 1550 x 1400 x 2250 mm
- Nettó tömege: 1450 kg
- A munkatartály mérete: 940 x 550 x 350 mm
- A munkaasztal méretei: 630 x 360 mm
- X, Y, Z tengely elmozdulások: 400 x 300 x 300 mm
- Munkaasztal max. terhelhetősége: 500 kg
- Max. elektróda tömeg: 50 kg
- Max. kimeneti áram: 50 A
- Max. teljesítményfelvétel: 3,3 kVA
- Bemeneti feszültség 380 V
- Max. megmunkálási sebesség: 420 mm³/perc

- Az elérhető legjobb felületi érdesség: $<R_a 0,12 \mu m$
- Min. elektródakopás: $<0,1\%$
- Dielektrikum tartály térfogata: 300 liter

4.2. Megmunkált anyagok

A kutatásom céljából készített kísérletek során az alábbi szerszámacél anyagok szikraforgácsolással szembeni viselkedését vizsgáltam:

- 40CrMnMo7 (1.2311) műanyag-alakító szerszámacél
- 40CrMnMoS8-6 (1.2312) műanyag-alakító szerszámacél
- 45NiCrMo16 (1.2767) hidegalakító szerszámacél
- C45U (1.1730) műanyag-alakító/hidegalakító szerszámacél

40CrMnMo7 (1.2311) műanyag-alakító szerszámacél

A 40CrMnMo7 (1.2311) egy előnemesített, króm-mangán-molibdén ötvöztetésű műanyag-alakító szerszámacél. Vegyi összetételét az 1. táblázat foglalja össze. [20]

1. táblázat A 40CrMnMo7 műanyag-alakító szerszámacél vegyi összetétele [20]

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Mo, %
0,40	0,30	1,50	1,90	0,20

Az anyag homogén szövetszerkezetű, jól, illetve gazdaságosan forgácsolható. Jó átedződésének köszönhetően egyenletes szilárdságú a teljes keresztmetszete mentén nagyobb méretek esetén is. Rendkívüli szívóssággal bír. Nitridálható, betétedzhető, lánggal és indukciósan edzhető, keménykrómozható, bevonatolható. Nagyon jól polírozható, szikraforgácsolható, fotomaratható, azonban rosszul hegeszthető és korrózióállósága gyenge. A 40CrMnMo7 szerszámacélt hőre lágyuló formákhoz, sajtolószerszámokhoz, nagyobb és közepes méretű fröccsöntő formákhoz használják, továbbá szerszámkeretek, általános gépészeti alkatrészek, készülékelemek, tengelyek, csapszegek alapanyaga. Szakítószilárdsága 950-1100 MPa, folyáshatára 827-862 MPa keménysége 280-325 HB közé tehető. Rugalmassági modulusa 190-210 GPa, szakadási nyúlása pedig 20%. [20] [21] [22]

40CrMnMoS8-6 (1.2312) műanyag-alakító szerszámacél

A 40CrMnMoS8-6 (1.2312), az 1.2311 jelzésű anyaghoz hasonlóan egy előnemesített, króm-mangán-molibdén ötvöztetésű műanyag-alakító szerszámacél. Ötvözői kén adalékot is tartalmaznak, ami lehetővé teszi a kiváló, nagyon gazdaságos forgácsolhatóságot nemesített állapotban is. A kénötvöztetés miatt viszont a szívóssági értékek anizotropok, keresztirányban alacsonyabbak, mint hosszirányban. Az anyag vegyi összetételét a 2. táblázat mutatja. [20] [23]

2. táblázat A 40CrMnMoS8-6 műanyag-alakító szerszámacél vegyi összetétele [20]

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Mo, %	S, %
0,40	0,40	1,50	1,90	0,20	0,08

Az 1.2312 jelzésű anyagról is elmondható, hogy jó az átedződése, ezáltal egyenletes szilárdságú a teljes keresztmetszet mentén nagyobb méretek esetén is. Nitridálható, betétedzhető. Azonban mivel a kén a mangánnal hosszan elnyúló szulfidokat alkot, ezért nem ajánlott fotomaradni (sorok keletkeznek a felszínen), polírozni (hullámos felület jön létre) és krómozni sem (pórusok képződnek). Szikraforgácsolásra a szulfidok okozta repedésveszély miatt csak korlátozottan, bevonatolásra pedig nem alkalmas. Ezeken kívül rosszul hegeszthető. Nagy szakítószilárdságú gépalkatrészek, szerszámkeretek, készülékelemek, általános gépészeti alkatrészek gyártása esetén használják. Alkalmazható még nagy és közepes méretű öntőformák esetén is, ahol fontos a jó forgácsolhatóság, de mérsékeltek a felületi minőségi követelmények és csekély a mechanikai, szívóssági igénybevétel. Továbbá könnyű megmunkálhatóságú prototípusformák gyártása esetén is alkalmas. A 40CrMnMo7 anyagminőséghez hasonlóan szakítószilárdsága 950-1100 MPa, Brinell keménysége 280-325 HB. Folyáshatára 820-850 MPa, szakadási nyúlása 9-10%, rugalmassági modulusa 205 GPa. [20] [23] [24]

45NiCrMo16 (1.2767) hidegalakító szerszámacél

A 45NiCrMo16 (1.2767) anyagminőség egy nikkelötvöztetésű hidegalakító szerszámacél. Homogén szövetszerkezetének köszönhetően nagyon jó szívóssággal, nyomószilárdsággal, ütésállósággal és átedzhetőséggel rendelkezik. A magas nikkeltartalom és a hozzá tartozó szénttartalom miatt, ez a minőség nagyon egyenletesen keményedő, méretében stabil acél. Vegyi összetételét a 3. táblázat prezentálja. [20] [25]

3. táblázat A 45NiCrMo16 hidegalakító szerszámacél vegyi összetétele [20]

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Mo, %	Ni, %
0,48	0,23	0,40	1,30	0,25	4,00

Egy egyszerűen hőkezelhető anyag, beedződése egyenletes nagyobb keresztmetszetek esetén is. Olajban és levegőn edzhető, hőkezelési méretváltozása csekély. Nagyon jól polírozható, fotomaratható, szikraforgácsolható, keménykrómozható, de rosszul hegeszthető. Alkalmazási területei közé tartoznak többek között a közepes vagy akár nagyon nagy méretű műanyag-alakító vagy szívós hidegalakító szerszámok, mint például a nagy szívóssági igénybevételű tömörsajtoló szerszámok, evőeszközök kivágószerszámjai, hidegbenyomó szerszámok, hidegollókések, vágó- és kivágószerszámok vastag lemezekhez, nehéz hidegalakítások és hajlítások szerszámjai. Húzópofák, nagy esztergapontozók, nagy szívóssági követelményű szerszámok, vasalatok, zsugorgyűrűk készítésére is alkalmas. Előszeretettel alkalmazzák sajtoló- és fröccsöntőformák gyártása esetén, ahol a nagy keménység, abrazív kopásállóság mellett a magas felületi minőség és a jó szívósság is követelmény. Jó szívóssági tulajdonságai alapján mély kimunkálású formákhoz is felhasználható. Szakítószilárdsága 650-880 MPa, folyáshatára 350-550 MPa, szokásos

munkakeménysége 50-56 HRC, szakadási nyúlása 8-25%, rugalmassági modulusa 200 GPa. [20] [26]

C45U (1.1730) műanyag-alakító/hidegalakító szerszámacél

A C45U (1.1730) a legelterjedtebb, ötvözetlen műanyag-alakító/hidegalakító szerszámacél. Vegyi összetételét a 4. táblázat foglalja össze. [20]

4. táblázat A C45U műanyag-alakító/hidegalakító szerszámacél vegyi összetétele [20]

C, %	Si, %	Mn, %
0,45	0,30	0,70

Jól forgácsolható, jól hegeszthető, jó szívósságú és felületi beedződésű. Különösen finom és homogén a szövetszerkezete, ezért kevésbé hajlamos a vetemedésre. Szokásos alkalmazási állapota normalizált. Lánggal és indukciósan, kisebb keresztmetszetek esetén olajban is edzhető. Kedvező tulajdonságainak köszönhetően sokoldalúan felhasználható minden területen. A műanyag- és kivágószerszámok alap építőeleme, készülékszerszámok alap- és keretlapjai készülnek belőle. Felhasználási területeihez tartoznak továbbá az alacsony terhelésű forma- és szerszámkeretek, a műanyag-alakító szerszámok felépítményei, a kilökő alap- és tartólapok, az alátétlapok, a flakonfúvó és habformák csekély polírozási követelményekkel, a szorító- és feszítőelemek, a befogóhüvelyek, a prototípus szerszámok. Ezeken kívül gyorsacél és keményfém szerszámok száranyaga. Nemesítve a legkülönbébb kéziszerszámok, kalapácsok, csavarkulcsok, vésők, fogók és mezőgazdasági szerszámok gyárthatók belőle. Szakítószilárdság kb. 650 MPa, alapkeménysége 190 HB körül van. Folyáshatára 350-550 MPa, rugalmassági modulusa kb. 200 GPa, szakadási nyúlása 8-25%-os tartományban mozog. [20] [27] [28]

Mind a négy anyagminőség esetében egy 115 x 140 x 15 mm nagyságú, téglalap keresztmetszetű próbadarab került megmunkálásra (19. ábra). A hideg húzással előgyártott munkadarab anyagok darabolására a cégnél került sor szalagfűrészgépen.



19. ábra Kísérleti próbadarabok szikraforgácsolás előtt

4.3. Szerszámelektrodák

A megmunkálási kísérletek elvégzéséhez, minden munkadarab anyag esetén réz (vörösréz), illetve grafit elektrodákat használtam.

Az alkalmazott réz elektrodák típusa CuETP elektrolitikus réz volt. Vegyi összetételét az 5. táblázat foglalja össze.

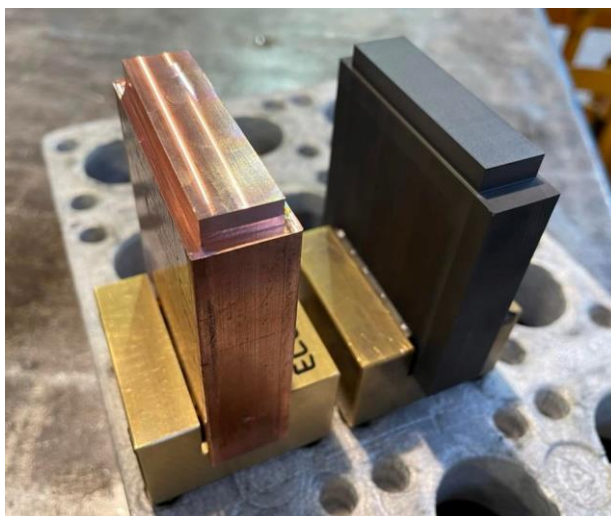
5. táblázat CuETP elektrolitikus réz vegyi összetétele [29]

Cu, %	Bi, %	O, %	Pb, %	Egyéb, %
>99,90	≤0,0005	≤0,04	≤0,03	≤0,03

A CuETP tiszta réz sűrűsége $8,94 \text{ g/cm}^3$, olvadáspontja $1084 \text{ }^\circ\text{C}$, rugalmassági modulusa $127 \cdot 10^3 \text{ MPa}$. Hővezetőképessége $20 \text{ }^\circ\text{C}$ -on $394 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, elektromos ellenállása $1,72 \text{ }\mu\Omega\text{cm}$, elektromos vezetőképessége 58 MS/m , fajlagos hője $25 \text{ }^\circ\text{C}$ -on $0,386 \text{ J/gK}$. [29]

A réz elektróda mellett, az üregek elkészítéséhez ELLOR-50-F típusú grafit elektrodákat használtam még. A grafit szemcsemérete $5 \text{ }\mu\text{m}$, a H skálán mért Rockwell keménysége 95 HRH, sűrűsége $1,86 \text{ g/cm}^3$, hajlítószilárdsága 76 MPa , elektromos ellenállása $1370 \text{ }\mu\Omega\text{cm}$. [30]

Az általam használt elektrodák a 20. ábrán láthatóak. Mind a réz, mind a grafit tekintetében, az elektrodák keresztmetszete $55 \times 15 \text{ mm}$ nagyságú volt.



20. ábra Az alkalmazott réz és grafit elektrodák

4.4. A szikraforgácsolási kísérletek kivitelezése, technológiai paraméterek

A próbadarabok szikraforgácsolását a 21. ábrán látottak szerint végeztem el. Az anyagminőségek és elektróda anyagok összehasonlítása érdekében végzett kísérletek során, minden darabra összesen tíz üreget készítettem: ötöt réz és ötöt grafit elektródával. Mindkét szerszámanyag esetében az öt üreg felületi érdesség értéke eltérő.



21. ábra Az elkészült kísérleti próbadarabok

A szikraforgácsolás megkezdése előtt, az alkalmazott szerszámgépen beállítottam a megmunkálás alapadatait, melyet felhasználva a gép optimalizálta az összes többi technológiai paramétert. Ezek az alapadatok a megmunkálni kívánt munkadarab anyaga, a szikrázott felület területe, az elektróda anyaga és darabszáma, az elérni kívánt felületminőség (VDI fokozat), a szikrázási mélység és a szikraköz értéke volt. Minden esetben 5 mm mélységű üregeket készítettem 0,3 mm-es szikraközzel. A munkadarab anyagát minden darabnál acélra állítottam be, a szikrázott felületek területe az elektródák keresztmetszete alapján (55x15 mm) 825 mm² volt. Az elektródák anyaga réz, illetve grafit volt és üregenként egy-egy elektródát alkalmaztam. A kívánt felületminőséget, azaz a VDI fokozatok értékét a szerszámgéphez tartozó VDI sablon (3. ábra), illetve a Viessmann Kft. megmunkálási szokásai, javaslatai alapján választottam meg. Az üregeket ezért VDI 18, 21, 25, 29, 36-os fokozattal készítettem, mely felületminőségeket ők is előszeretettel alkalmaznak a szerszámaik gyártása során. Minden más technológiai paraméter a szerszámgép szerint optimálisnak vélt értékre lett beállítva.

Az elektródák számának, mint a megmunkálás egyik befolyásoló tényezőjének vizsgálatára készült kísérletemet a 45NiCrMo16 anyagminőségű próbadarab hátoldalára készítettem el. Ennek a kísérletnek a keretében, mind a réz, mind a grafit szerszámanyag esetében két-két üreg készült. A beállítható alapadatok közül a szikrázási mélységet, a munkadarab anyagát, a szikrázási területet és az elektródák anyagát változtatlanul hagytam. Mindkét szerszámanyagnál az egyik üreg két, a másik pedig három elektródával készült. Mivel itt több elektródát alkalmaztam, ezért ez esetben magát a megmunkálást úgy kell elképzelni, mintha a készre munkálás nagyoló és simító szakaszokra lenne felosztva. Emiatt minden elektróda cserénél változik az alkalmazott szikraköz értéke, melyeket technológiai ajánlások alapján választhatunk meg. A két elektródával készült üregek esetében először 0,3

mm, majd 0,1 mm, a három elektródával készült üregeknél pedig 0,3 mm, 0,2 mm, végezetül 0,1 mm-es szikraköz értéket állítottam be. A munkadarab anyagának és a VDI fokozat kiválasztása során ismét igyekeztem a cég ipari körülményeihez igazodni, ezért ezt a kísérletet a 45NiCrMo16 anyagminőségen készítettem el, a könnyebb összehasonlíthatóság kedvéért minden üreget VDI 25-ös érdességi fokozatban. A megmunkálás végeredményét a 22. ábra prezentálja.



22. ábra Az elektródák számának vizsgálatára készült kísérlet

4.5. Az alkalmazott mérőberendezés és mérőeszköz jellemzői, a mérések kivitelezése

A kísérletek elkészítését követően elvégeztem a kutatásomhoz szükséges méréseket. Az összehasonlító vizsgálataim alapjául a megmunkált felület érdessége, a méreteltérés és a megmunkálási idők tanulmányozása szolgált.

A megmunkált üregek felületi érdességmérését a Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézetének laboratóriumában végeztem a 23. ábrán látható AltiSurf 520 háromdimenziós felülettopográfiai berendezésén.

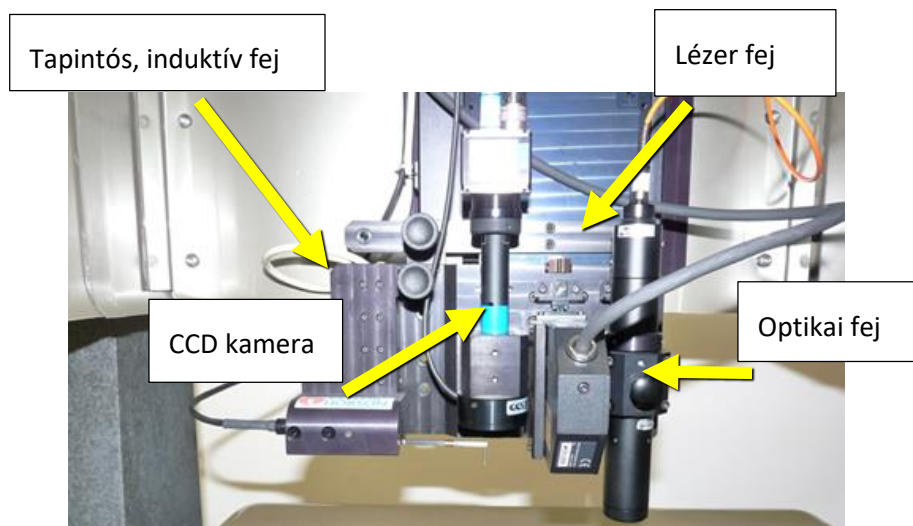


23. ábra AltiSurf 520 háromdimenziós felülettópográfiai berendezés

A berendezés az alábbi három mérési móddal rendelkezik:

- Gyémánttűs induktív fej: $2\ \mu\text{m}$ csúcsrádiusz diamond stylus tip, függőleges felbontás: $0,2\text{--}4\ \mu\text{m}$, vízszintes felbontás: $2\ \mu\text{m}$
- LK-G32 lézeres mérőfej: függőleges felbontás: $1\text{--}3\ \mu\text{m}$
- CL2 optikai konfokális fej: függőleges felbontás: $0,012\ \mu\text{m}$ maximálisan
- Továbbá egy nagy felbontású CCD kamerával is rendelkezik, mellyel a vizsgált felület jellegéről képek készíthetők

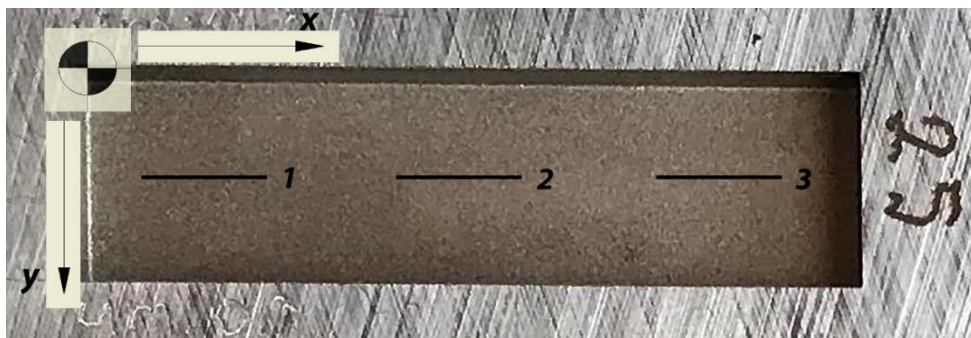
A mérőberendezés felsorolt egységeit a 24. ábra szemlélteti.



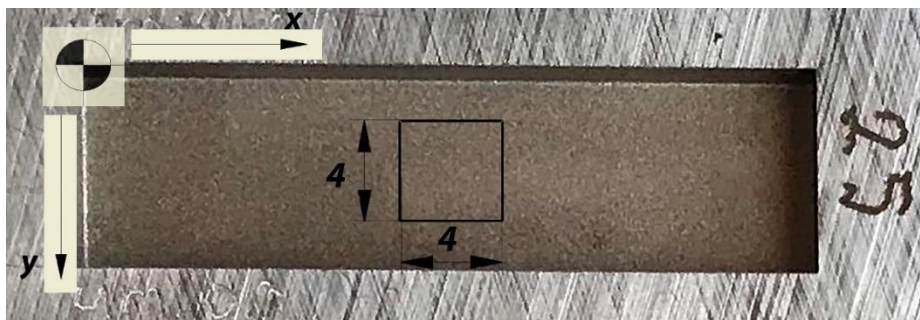
24. ábra AltiSurf 520 háromdimenziós felülettópográfiai berendezés egységei

Az érdességmérések alkalmával a CL2 optikai konfokális fejjel végeztem a vizsgálataimat. Ennek oka, hogy a három mérési mód közül a konfokális fej rendelkezik a legnagyobb függőleges felbontással, aminek köszönhetően nagy pontosságú eredményt kaphatok a

felület karakterisztikájáról. A szikraforgácsolt üregek felületén a 2D-s mikrogeometriai és a 3D-s felülettopográfiai jellemzők alakulását is vizsgáltam. A 2D-s jellemzőket, minden üregben három, $l = 12,5$ mm hosszú szakasz mentén vizsgáltam. A mérési helyeket az üregek középvezetékében vettem fel. A 3D-s mérések során egy 4×4 mm nagyságú területet vizsgáltam az üregek közepén. Minden esetben a szűrési paramétert (cut-off) 2,5 mm-re állítottam be. A mérési helyek jelleghelyes elhelyezkedését a 25. és 26. ábra szemlélteti.



25. ábra Mérési helyek 2D-s mérések esetén



26. ábra Mérési helyek 3D-s mérések esetén

A 2D-s mérési helyek kezdőpontjainak, illetve a 3D-s mérési hely középpontjának koordinátái a következők:

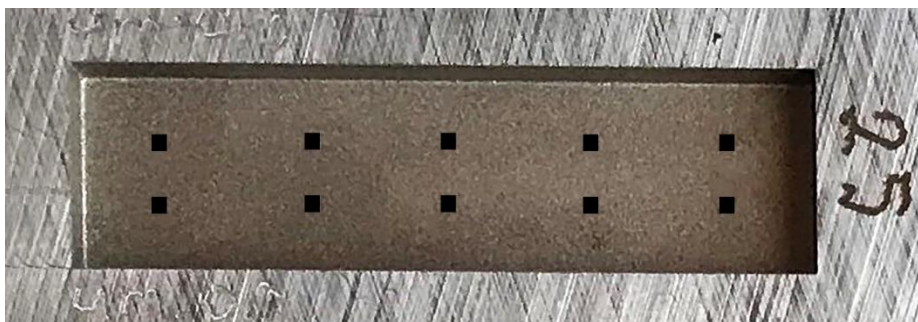
2D:

- 1. mérési hely: $x = 7,5$ mm; $y = 7,5$ mm
- 2. mérési hely: $x = 21,25$ mm; $y = 7,5$ mm
- 3. mérési hely: $x = 35$ mm; $y = 7,5$ mm

3D:

- 1. mérési hely: $x = 27,5$ mm; $y = 7,5$ mm

Az üregek mélység irányú eltérésmérését a Viessmann Modellgyártó Kft. CNC-műhelyében végeztem egy 0-300 mm mérési tartományú, Mitutoyo 192-651 mérőórán. Az eltérések meghatározásához, az üregek közepére tíz mérési helyet vettem fel a 27. ábrán sematikusan ábrázoltak szerint. Ennél a mérésnél a mérési pontok koordinátái nem konkretizáltak, helyeik üregenként csak megközelítőleg egyeznek. Ezt azért tehettem meg, mert a szikrázás téglalap keresztmetszetű elektródával, tehát sík felület mentén történt, ebből kifolyólag nem a pontonkénti eltérések, hanem ezek átlaga lesz a mérendő az összehasonlítás során.



27. ábra Mérési helyek a méretpontosság vizsgálata során

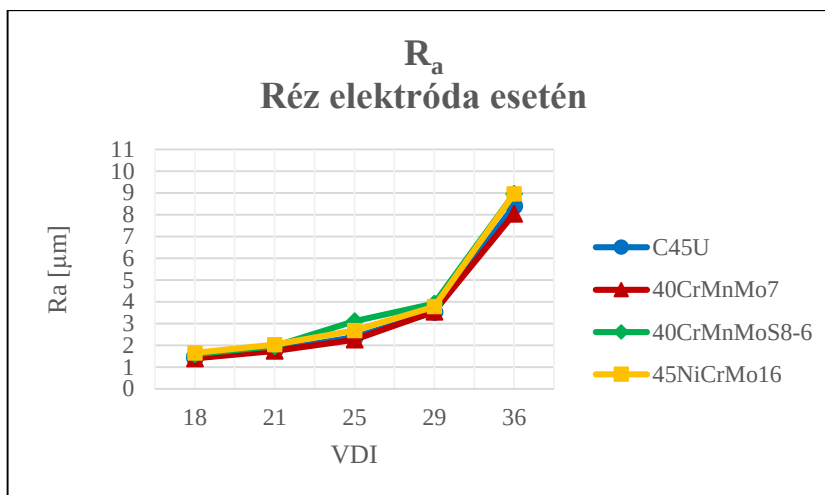
A szikraforgácsolási teljesítményre, azaz ennek termelékenységére az egyes üregek megmunkálási idejéből vonhatók le következtetéseket. Az egyes üregek megmunkálási idejét a szerszámgép kijelzőjéről olvastam le a program lefutását követően.

5. Kísérleti eredmények kiértékelése

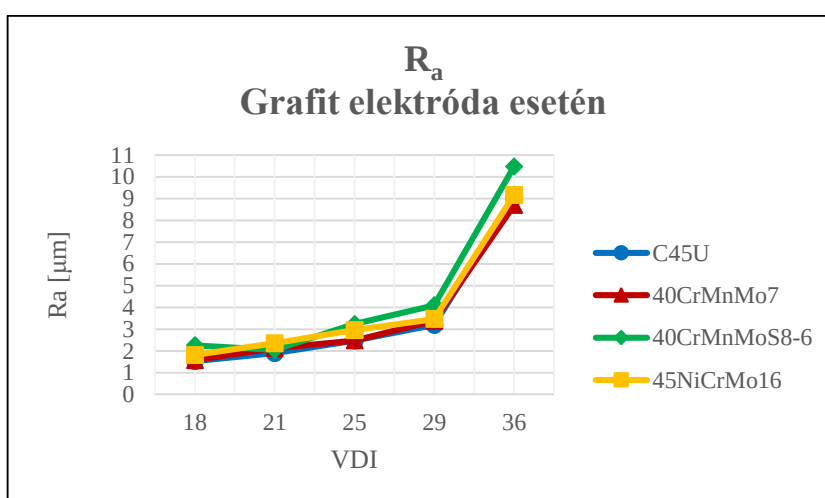
Kutatásom során, négyféle, különböző ötvözésű szerszámacél munkadarab szikraforgácsolásának összehasonlító vizsgálatával foglalkozom. A szikraforgácsolással készített kísérleteimet réz és grafit elektródákkal végeztem. Az összehasonlítás során, vizsgálom a megmunkált anyagminőségek 2D-s és 3D-s érdességi mérőszámait a szerszámgépen beállítható VDI fokozatok függvényében. Választ szeretnék kapni arra is, hogy a különböző szerszámanyagok használata, valamint az elektródák számának változtatása hogyan befolyásolja a szikraforgácsolás eredményét az előállított felületi érdesség és a megmunkálás termelékenysége szempontjából. Végezetül megvizsgálom, hogy a különböző szerszámacélok használata hatást gyakorol-e a megmunkálás méretpontosságára.

5.1. Amplitúdó paraméterek vizsgálata

Elsőként a négyféle anyagminőség 2D-s felületi érdességi jellemzőit vizsgálom meg, kezdve az amplitúdó paraméterek elemzésével. A 28. és 29. ábrán az R_a átlagos felületi érdesség változását tekinthetjük meg a megmunkálás VDI fokozatainak függvényében, réz és grafit elektródával végzett szikraforgácsolás esetén. Az ábrákról jól leolvasható az az általánosan elfogadott tény, miszerint a VDI fokozatok növekedésével egyre durvább felületminőség állítható elő és ez a fokozatonkénti minőség romlás exponenciálisan változik. A vizsgált szerszámacélokról elmondható, hogy R_a tekintetében nem tapasztalható számottevő különbség közöttük. Mindkét elektróda anyag esetén az ötvözetlen C45U és a legkevesebb ötvözt tartalmazó 40CrMnMo7 anyagminőségen értem el legjobb érdesség értékeket. A szikraforgácsolt felület minősége a 40CrMnMoS8-6 acélon lett a leggyengébb. A réz elektródával előállított felületek érdessége $R_a = 1,4-9 \mu\text{m}$ között, a grafit elektródánál $R_a = 1,5-10,5 \mu\text{m}$ között változtak.

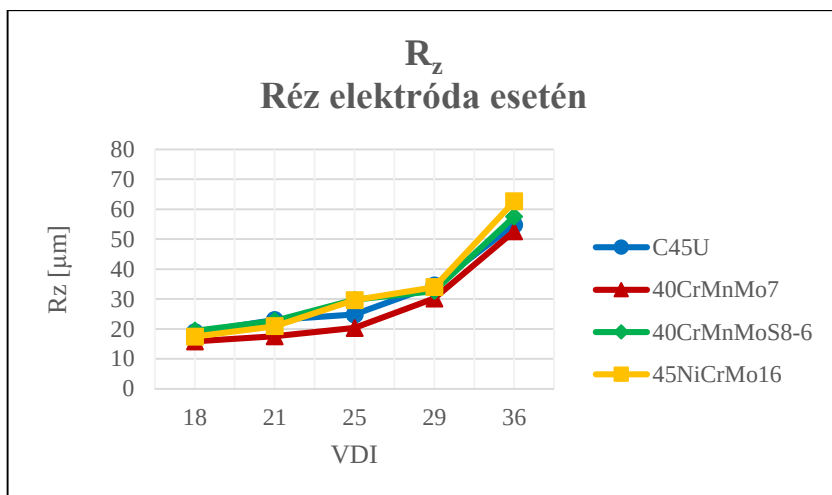


28. ábra R_a paraméter változása a VDI fokozat függvényében réz elektróda esetén

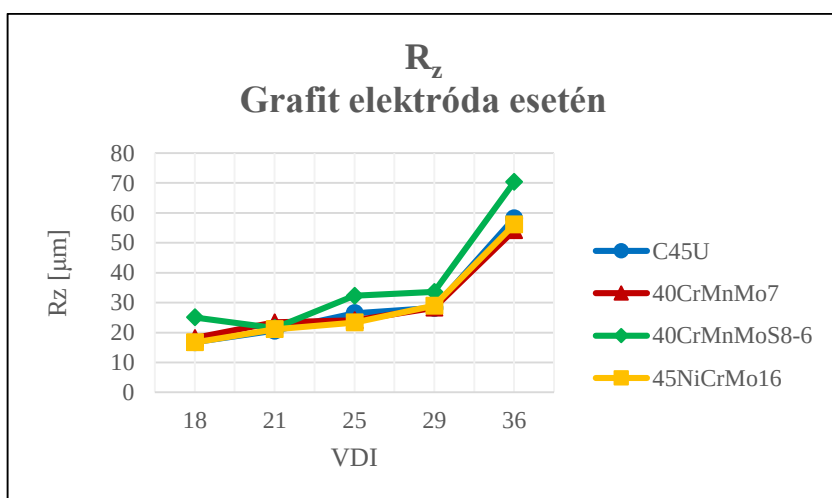


29. ábra R_a paraméter változása a VDI fokozat függvényében grafit elektróda esetén

A 30. és 31. ábra az R_z egyenetlenség magasság változását írja le a VDI fokozatok függvényében. Az R_a paraméternél tett általános megállapítások itt is helytállóak. A munkadarab anyagok között itt is kisebb eltérések tapasztalhatók, viszont a legjobban és legrosszabbul teljesítő anyagminőséget nehezebb megítélni az egyes elektródák esetén. Talán elmondható, hogy réznél a 40CrMnMo7 acélon készültek a legfinomabb felületek, grafitnál pedig egyértelműen a 40CrMnMoS8-6 anyagon a legdurvábbak. Réz esetén az R_z értékei 15,8-62,6 μm , grafit esetén pedig 16,7-70,3 μm tartományban mozogtak. A mért adataim alapján elmondható, hogy szikraforgácsolt felületek esetén R_z értékei R_a -hoz képest $R_z \approx (6 \div 13) \cdot R_a$ arányban változnak, míg forgácsolt felületeknél, a szakirodalom szerint, ez az arány ötszörös.



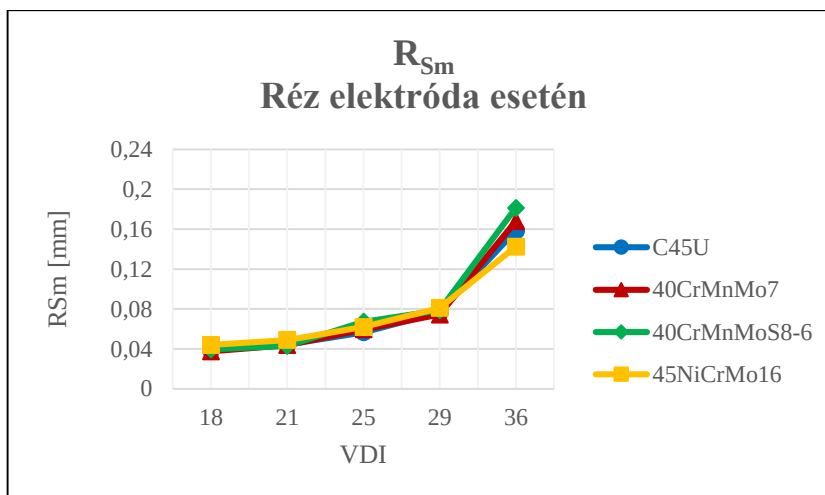
30. ábra R_z paraméter változása a VDI fokozat függvényében réz elektróda esetén



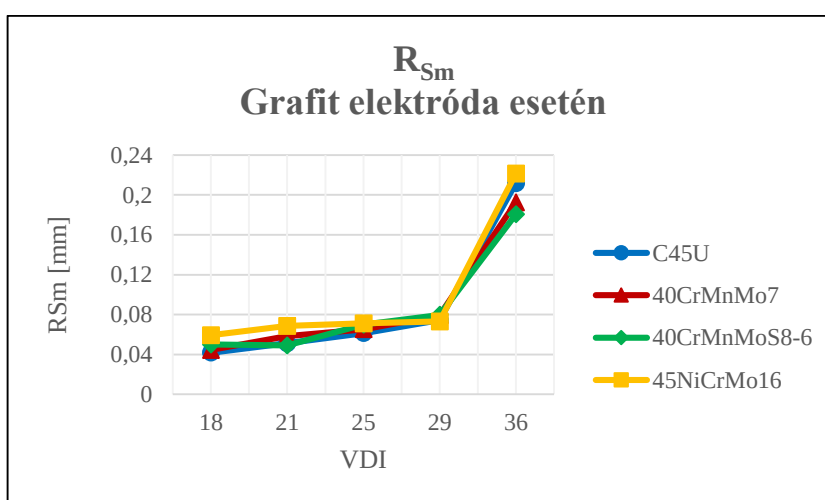
31. ábra R_z paraméter változása a VDI fokozat függvényében grafit elektróda esetén

5.2. Térköz paraméterek vizsgálata

A térköz paraméterek közül, az R_{sm} egyenetlenségek közepes hullámhosszát vizsgáltam, melynek változását a VDI függvényében a 32. és 33. ábra mutatja. Az ábrák alapján, a vizsgált VDI tartományban elmondható, hogy alacsonyabb fokozatokban kisebb (pláne réz elektródánál), VDI 36-os fokozatban pedig nagyobb eltérések észlelhetők az egyes anyagminőségek között. Ez esetben az anyagban előforduló ötvözők mennyisége nem volt hatással a paraméter alakulására. A legkedvezőbben és a leggyengébben teljesítő acél nem állapítható meg egyértelműen egyik elektródánál sem, fokozatonként más és más eredmény született. R_{sm} értéke réznél 0,04-0,18 mm, grafitnál 0,04-0,22 mm között változott.



32. ábra R_{Sm} paraméter változása a VDI fokozat függvényében réz elektróda esetén

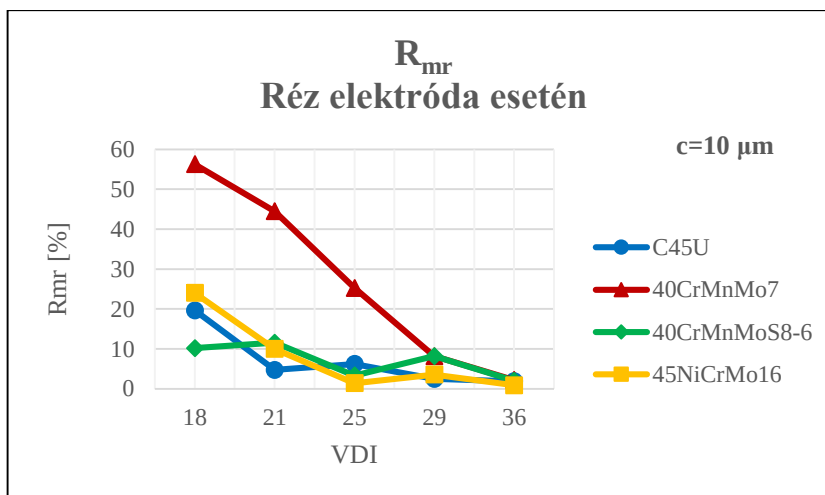


33. ábra R_{Sm} paraméter változása a VDI fokozat függvényében grafit elektróda esetén

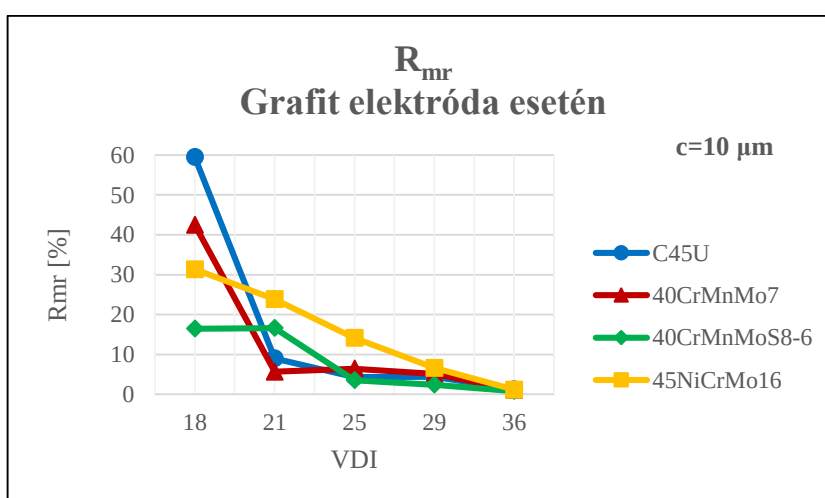
5.3. Anyaghányad és funkcionális paraméterek vizsgálata

A 34. és 35. ábra a réz és grafit elektródával készült üregek anyaghányad paramétereinek alakulását mutatja az egyes VDI fokozatokban. Az R_{mr} anyaghányad paraméter a felületek működési és kopási tulajdonságainak jellemzésére szolgál. Minél nagyobb egy adott felület százalékos R_{mr} értéke, annál kedvezőbb működési tulajdonságokkal rendelkezik. Vizsgálataim során, az anyaghányad paraméter értékeit $c = 10 \mu m$ mélységnél határoztam meg.

Az ábrákon megfigyelhető, hogy a legkedvezőbb működési tulajdonságok VDI 18 fokozatban érhetők el és a VDI fokozatok növelésével – szerszám és munkadarab anyagtól függetlenül – egyrészt romlanak a felületek jellemzői, másrészt csökken az egyes acélok közötti anyaghányad paraméter különbség. Réz elektróda esetén, kiemelkedő tulajdonságok érhetők el a 40CrMnMo7 anyagminőség szikraforgácsolásakor, grafit esetén pedig a C45U és a 45NiCrMo16 acélra mondható el ugyanez. VDI 18 fokozaton, a legalacsonyabb százalékos értékeket a kén ötvözt is tartalmazó 40CrMnMoS8-6 anyagra kaptam. A többi fokozaton a gyengébb értékek fokozatonként változnak.

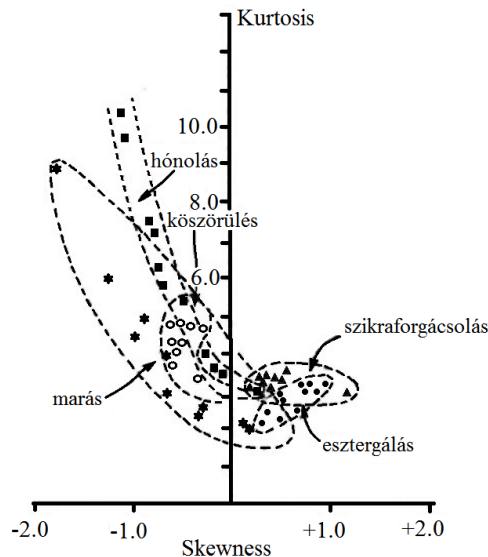


34. ábra R_{mr} paraméter változása a VDI fokozat függvényében réz elektróda esetén



35. ábra R_{mr} paraméter változása a VDI fokozat függvényében grafit elektróda esetén

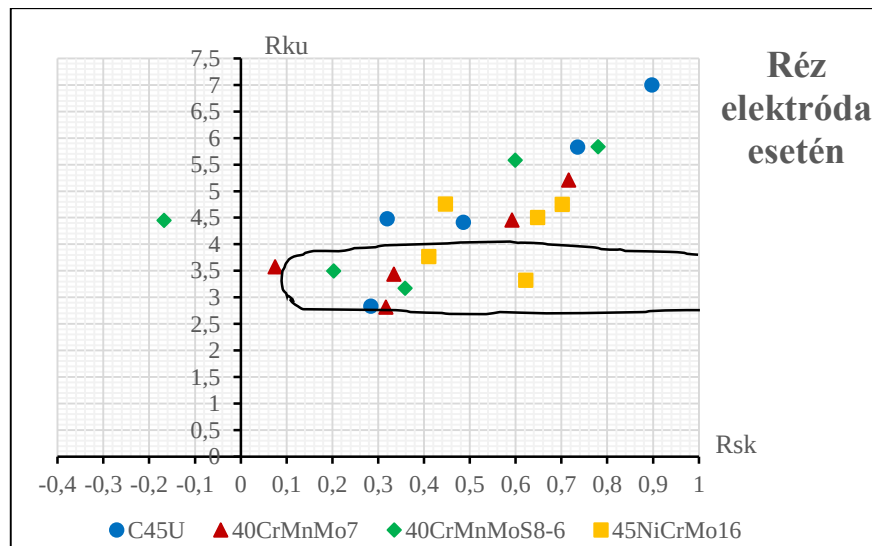
Az R_{mr} anyaghányad paraméter mellett, a funkcionális paraméterek közül R_{sk} ferdeségi és R_{ku} lapultsági mérőszám is nagyon fontos műszaki és gyakorlati jelentést hordoz a valós működő felületekről. Az R_{sk} - R_{ku} paraméterek értékeit felhasználva topológiai térkép készíthető. A topológiai térkép egy R_{sk} - R_{ku} síkon ábrázolt pontsor, amely a gyártott felület mért érdességének ferdeségi (skewness) és lapultsági (kurtosis) paramétereit adja meg. A különböző forgácsolási technológiával készült felületek R_{sk} és R_{ku} összetartozó értékei a forgácsoló technológiától függő csoportokat alkotnak (36. ábra). Eltérő technológiával gyártott felületek különböző R_{sk} - R_{ku} értékekkel rendelkeznek. [18]



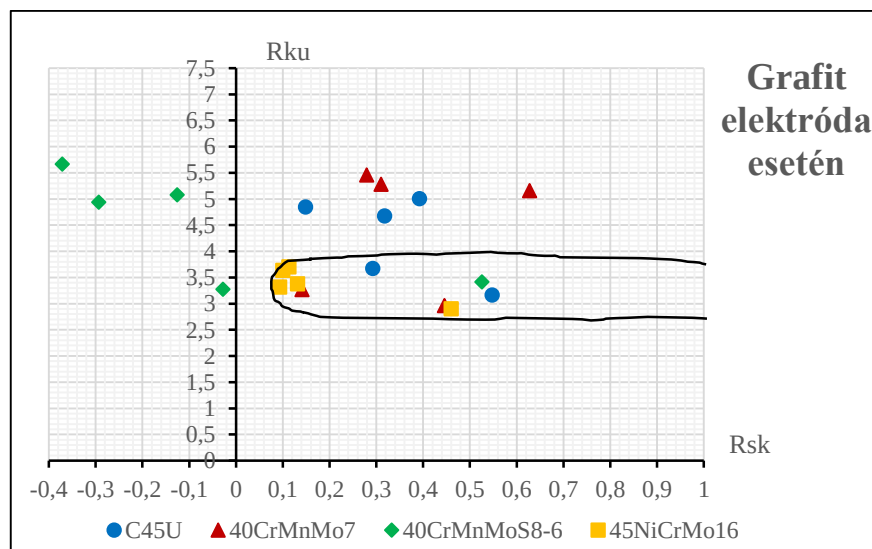
36. ábra Különböző forgácsolási eljárásokkal készített felületek topológiai térképe [18]

A 36. ábra szerint a szikraforgácsolás technológiája $R_{sk} \approx 0,1-1,3$, $R_{ku} \approx 2,9-4$ tartományra tehető. Fontos megjegyezni, hogy az ábrán szereplő technológiai csoportok elhelyezkedése csak hozzávetőleges, előfordulhat, hogy egyes R_{sk} - R_{ku} értékek a tartományon kívülre esnek. A topológiai térképen minél inkább balra és lejjebb helyezkedik el a mért felület textúrájának R_{sk} - R_{ku} paraméterpárosa, annál kedvezőbbek a működés közben megfigyelhető tulajdonságai. [18]

A mérési eredményeim pontosabb kiértékelése céljából, a mért adataim alapján saját topológiai térképet készítettem, jelölve rajtuk a szikraforgácsolás technológiájának elméleti elhelyezkedését is (37. és 38. ábra). Figyelembe véve, hogy a legkedvezőbb tulajdonságokat a leginkább balra és lejjebb elhelyezkedő R_{sk} - R_{ku} paraméter párosok adják, a mérési eredményeimből arra következtetek, hogy réz elektródával legjobban a 40CrMnMoS8-6 és 40CrMnMo7, grafit elektródával pedig a 40CrMnMoS8-6 és 45NiCrMo16 acélok felületein sikerült elérni ezt. A legkedvezőtlenebb tulajdonságokat hozó acélra nem született egyértelmű eredmény. Megvizsgálva a szakirodalom szerint körülhatárolt technológiai területet, a mért értékek alapján elmondható, hogy a legkedvezőbb tulajdonságokat hordozó anyagminőségek mérési pontjai nem feltétlenül estek bele az elméleti adathalmazba.



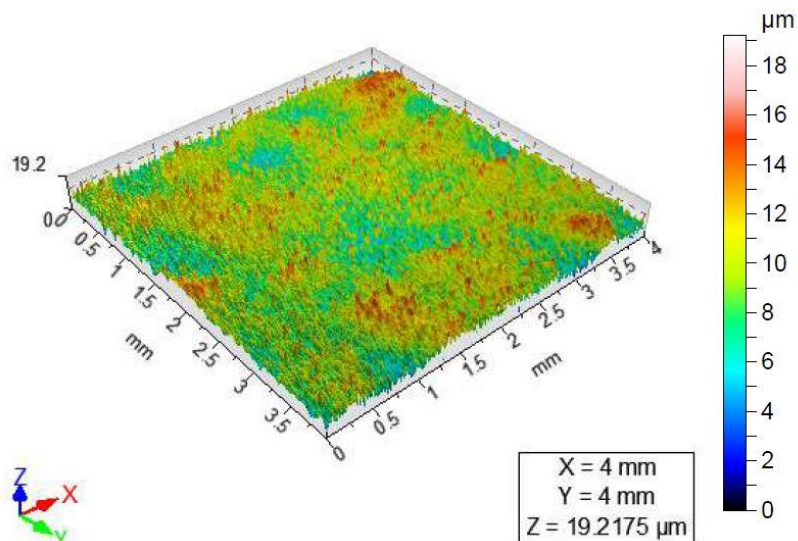
37. ábra Topológiai térkép réz elektróda esetén



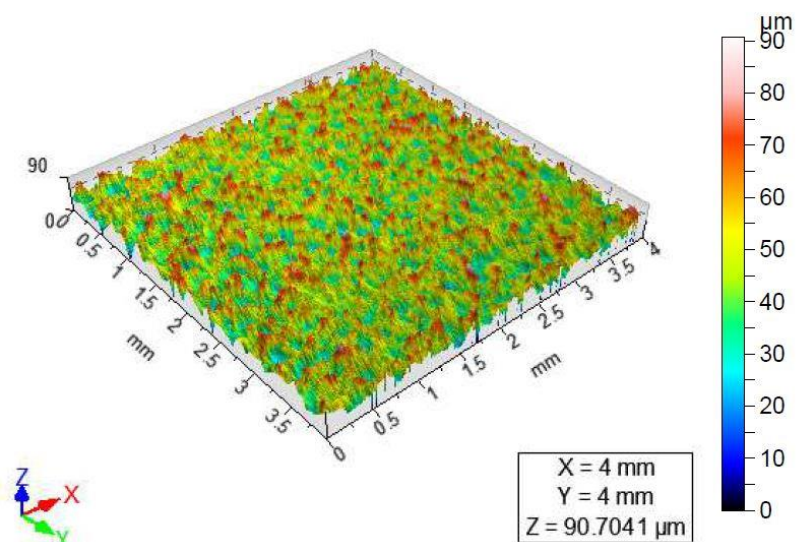
38. ábra Topológiai térkép grafit elektróda esetén

5.4. Felülettopográfiai jellemzők vizsgálata

A pontosabb mérési eredmények meghatározása céljából, a 2D-s érdességi paraméterek mellett megvizsgáltam a felületek topográfiai 3D-s jellemzőit is. A topográfiai mérések előnye, hogy míg a mikrogeometriai mérések alkalmával vonal mentén történik a mérés, addig a 3D-snél több vonalmenti mérésből álló területet vizsgálunk, ezáltal sokkal részletesebb, pontosabb képet tudunk kapni a vizsgált felület karakterisztikájáról. Ilyen 3D-s képre mutat példát a 39. és 40. ábra, melyen a 45NiCrMo16 acél réz elektródával szikraforgácsolt felületei láthatók, VDI 18 és VDI 36 fokozatok alkalmazása mellett.

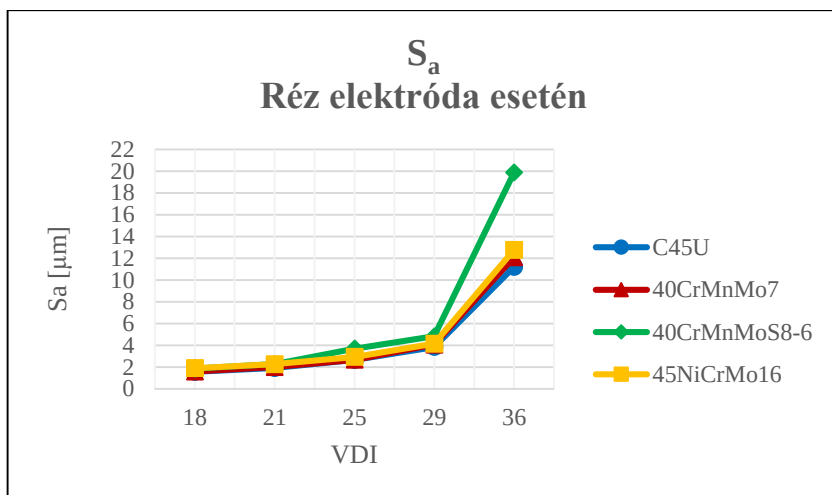


39. ábra 45NiCrMo16 acél réz elektródával, VDI 18 fokozaton szikraforgácsolt felülete

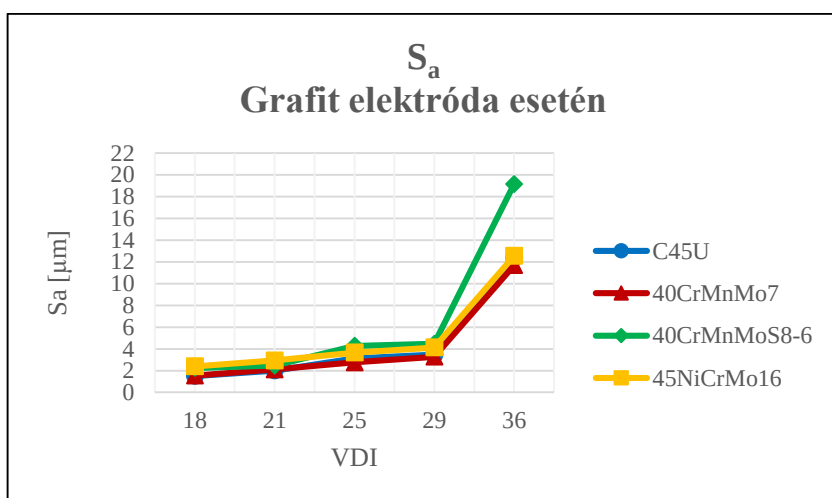


40. ábra 45NiCrMo16 acél réz elektródával, VDI 36 fokozaton szikraforgácsolt felülete

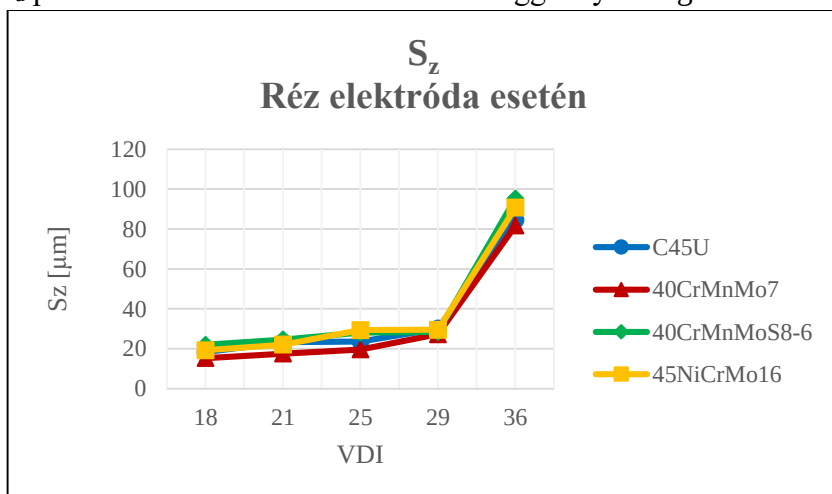
A 41. és 42. ábrán az S_a térbeli átlagos érdesség, a 43. és 44. ábrán az S_z felületek egyenetlenség magasságának változása látható a vizsgált szerszámacélokon, VDI paraméter függvényében. Az ábrákon megfigyelhető, hogy S_a és S_z értékei hasonló képet mutatnak 2D-s megfelelőikkel. Ezen kívül tapasztalható, hogy a topográfiai mérések során nagyobb mért értékek kaphatók, mint a profilmérések esetén, melynek oka a felületről hordozott lényegesen több információ. A két paraméter tekintetében a jobb felületminőségeket főként a C45U és a 40CrMnMo7, egy-két fokozatban a 45NiCrMo16 acél felületein értem el, a magasabb érdesség értékeket pedig általában a 40CrMnMoS8-6 acélra készített üregek felületein kaptam. A réz elektródával megmunkált üregekben $S_a = 1,6-20 \mu\text{m}$, $S_z = 15,3-95,3 \mu\text{m}$, a grafit elektródával megmunkáltakban $S_a = 1,5-19,1 \mu\text{m}$, $S_z = 17-115 \mu\text{m}$ érdesség tartományokat mértem.



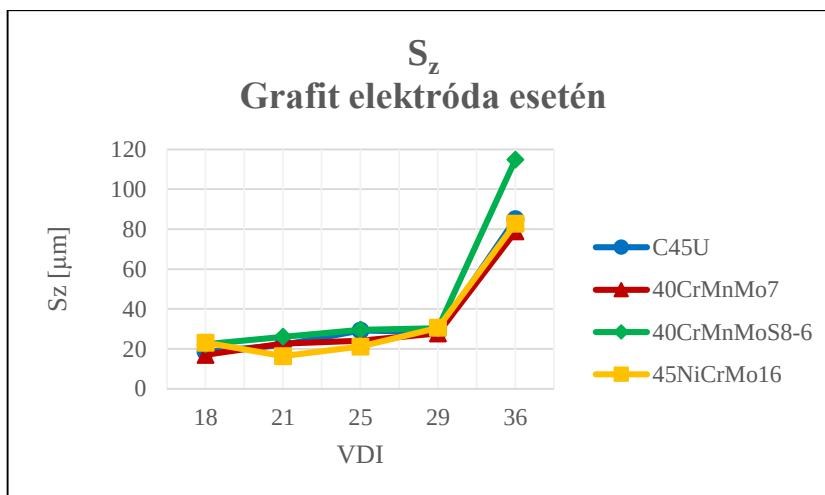
41. ábra S_a paraméter változása a VDI fokozat függvényében réz elektróda esetén



42. ábra S_a paraméter változása a VDI fokozat függvényében grafit elektróda esetén

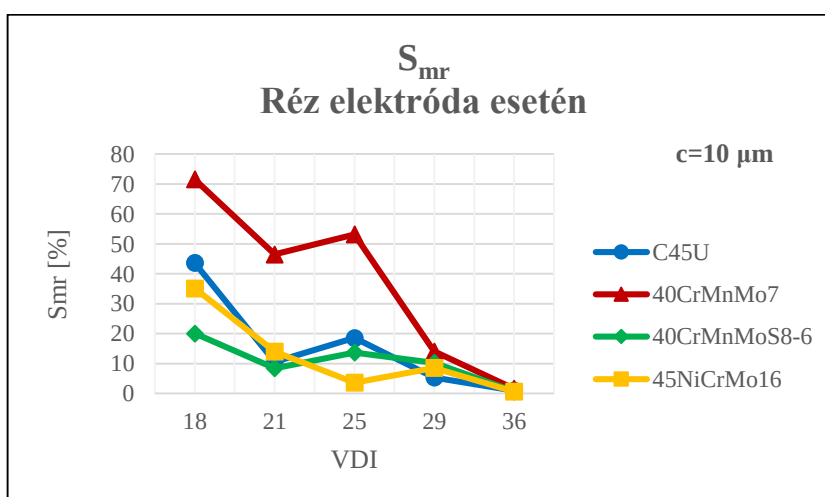


43. ábra S_z paraméter változása a VDI fokozat függvényében réz elektróda esetén

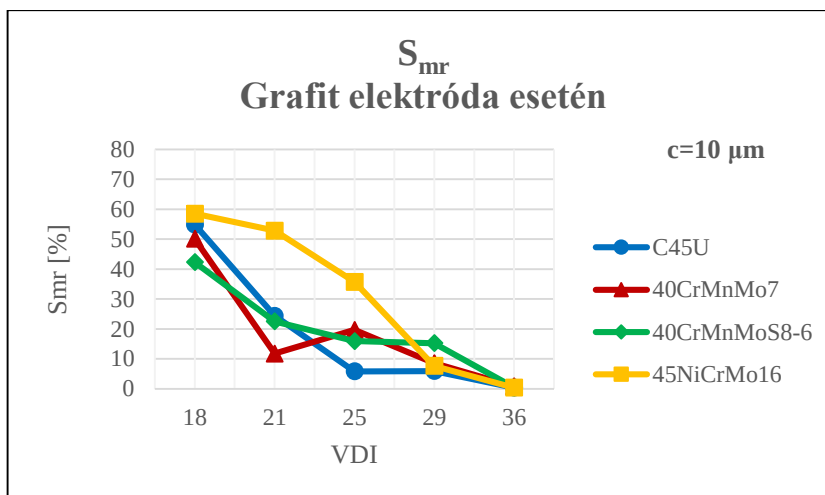


44. ábra S_z paraméter változása a VDI fokozat függvényében grafit elektróda esetén

A topográfiai jellemzők közül megvizsgáltam az S_{mr} anyagtérfogati hányadot is, $c = 10 \mu m$ mélységben (45. és 46. ábra). Ennél a paraméternél is elmondható, hogy nagyjából teljes analógiát mutat a 2D-s megfelelőjével. Réz elektródánál, a legjobb működési és kopási tulajdonságokkal a 40CrMnMo7, grafit elektródánál a 45NiCrMo16 felületei rendelkeznek. A legrosszabb eredményt VDI fokozatonként eltérő anyag mutatta.



45. ábra S_{mr} paraméter változása a VDI fokozat függvényében réz elektróda esetén

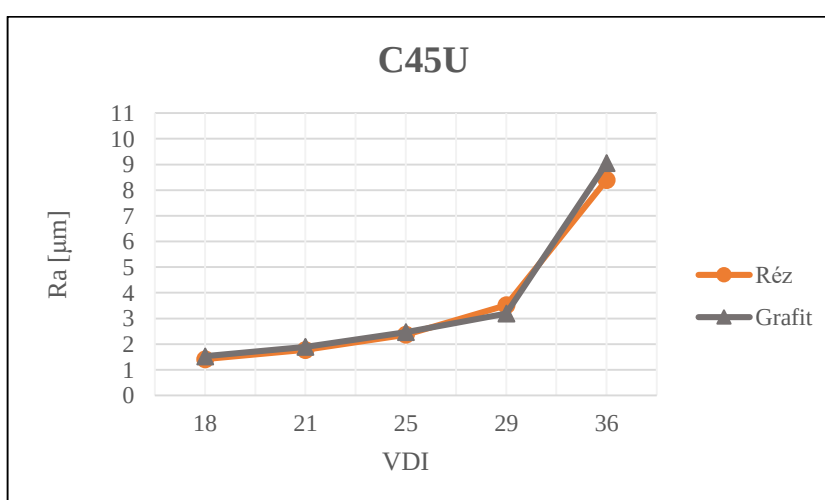


46. ábra S_{mr} paraméter változása a VDI fokozat függvényében grafit elektróda esetén

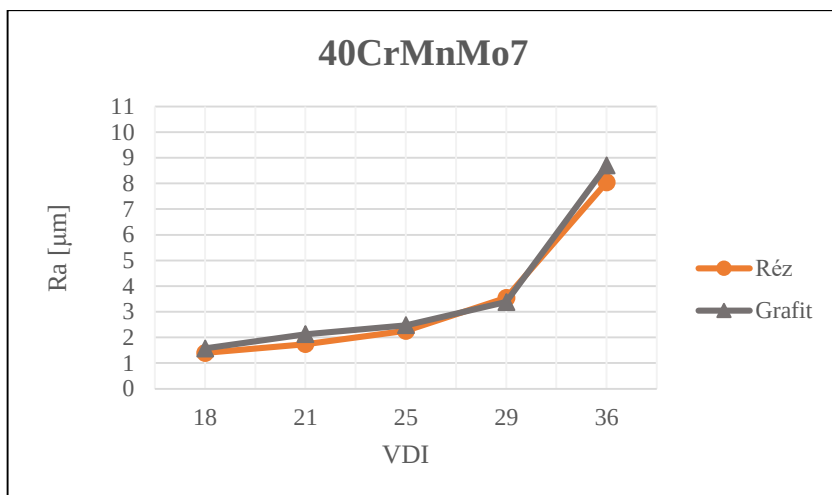
5.5. A szerszámanyagok hatása a vizsgált szerszámacélok felületminőségére

A következőkben arra vagyok kíváncsi, hogy a vizsgált szerszámacélok felületi érdességét miként befolyásolja a szerszámanyagok változtatása. Ebből a megközelítésből elemzem a grafit és a réz elektródával készült üregek R_a , R_{mr} , S_a és S_{mr} paramétereit.

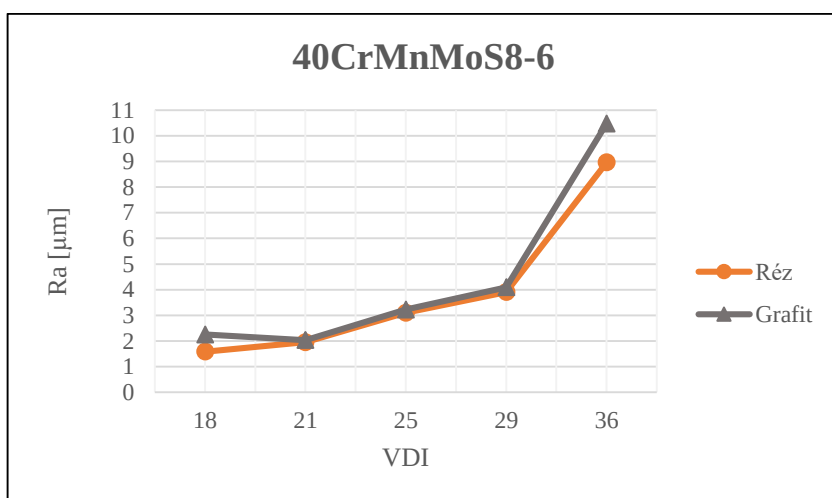
A 47-50. ábrákon a réz és grafit elektródákkal megmunkált üregek átlagos érdesség értékeinek változása látható a VDI fokozatok függvényében mind a négy szerszámacélon. A grafikonok alapján megállapítható, hogy egy-két kivételtől eltekintve hasonló eredményre jutottam mind a négy esetben: R_a vonatkozásában csekély a szerszámanyagok közötti érdességkülönbség. VDI 18-25 fokozatokban a réz elektródával készültek a finomabb felületek. A 40CrMnMoS8-6 acél kivételével VDI 29-es fokozaton a grafit szerszám hozta a jobb eredményt. VDI 36-os fokozaton általában nagyobb eltérés figyelhető meg a két szerszámanyag között, ezen ismét a réz elektróda teljesített jobban az átlagos érdesség szempontjából.



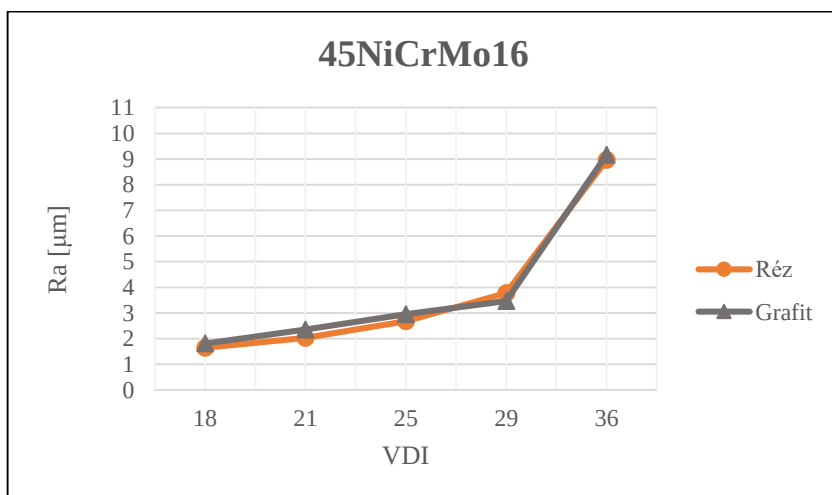
47. ábra Szerszámanyagok hatása az R_a paraméterre C45U acél esetén



48. ábra Szerszámanyagok hatása az R_a paraméterre 40CrMnMo7 acél esetén



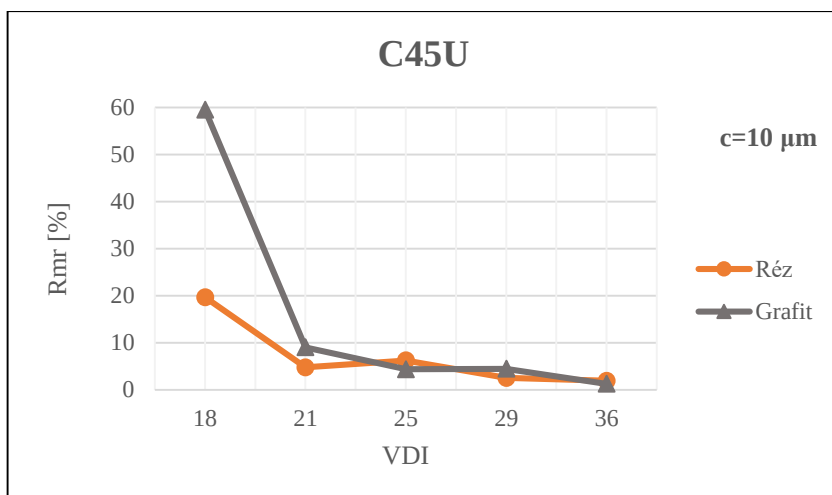
49. ábra Szerszámanyagok hatása az R_a paraméterre 40CrMnMoS8-6 acél esetén



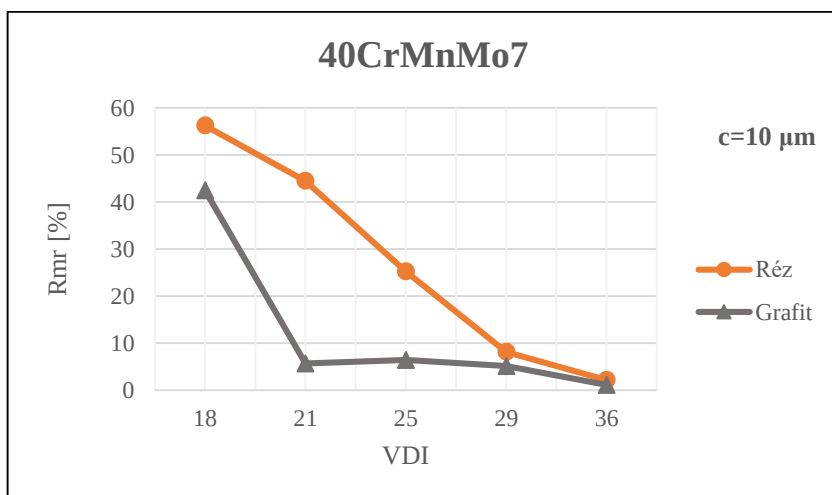
50. ábra Szerszámanyagok hatása az R_a paraméterre 45NiCrMo16 acél esetén

Az 51-54. ábrák az R_{mr} anyaghányad paraméter alakulását prezentálják. A diagramokról jól kivehető az a korábbi megállapítás, miszerint a VDI fokozatok növelésével romlanak a felületek működési tulajdonságai. R_a -val ellentétben, az R_{mr} -ről készült grafikonok karakterisztikája minden szerszámacélnál merőben más képet mutatnak. C45U acélról

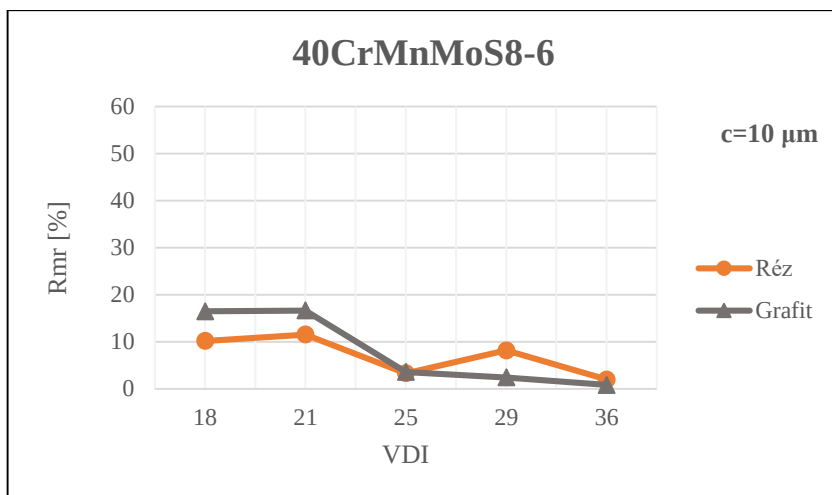
elmondható, hogy VDI 18 fokozaton dominánsan a grafit készített rajta jobb tulajdonságú felületet, a többi fokozaton pedig változó melyik elektródánál jobbak az eredmények. A 40CrMnMo7 acélon egyértelműen a réz elektróda eredményezett kedvezőbb működési tulajdonságokat minden fokozaton. A 40CrMnMoS8-6 anyagminőségnél azt tapasztaltam, hogy alacsonyabb VDI fokozatokon a grafit, magasabb VDI fokozatokon a réz által előállított jellemzők a kedvezőbbek. A VDI 25 és 36-os fokozaton készült üregek tulajdonságai közel azonosak. A 45NiCrMo16 anyag esetén, akárcsak a 40CrMnMo7-nél magas százalékos értékeket mutat az R_{mr} paraméter, azonban itt a grafittal sikerült elérni a jobb működési tulajdonságokat.



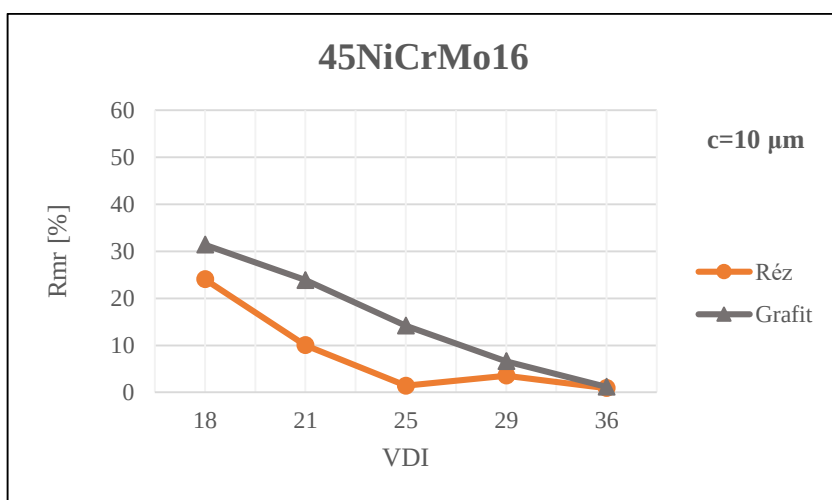
51. ábra Szerszámanyagok hatása az R_{mr} paraméterre C45U acél esetén



52. ábra Szerszámanyagok hatása az R_{mr} paraméterre 40CrMnMo7 acél esetén

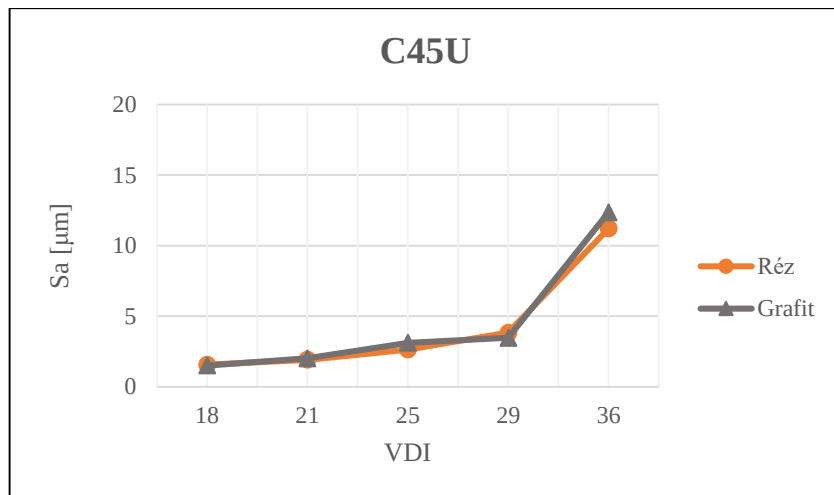


53. ábra Szerszámanyagok hatása az R_{mr} paraméterre 40CrMnMoS8-6 acél esetén

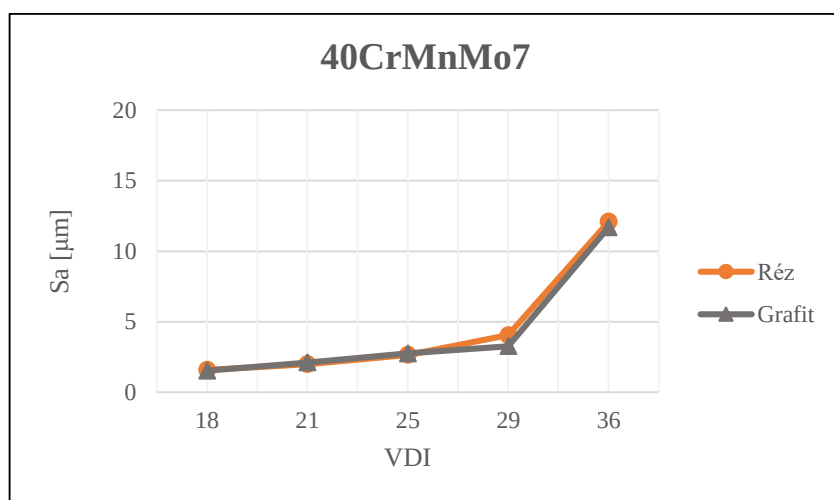


54. ábra Szerszámanyagok hatása az R_{mr} paraméterre 45NiCrMo16 acél esetén

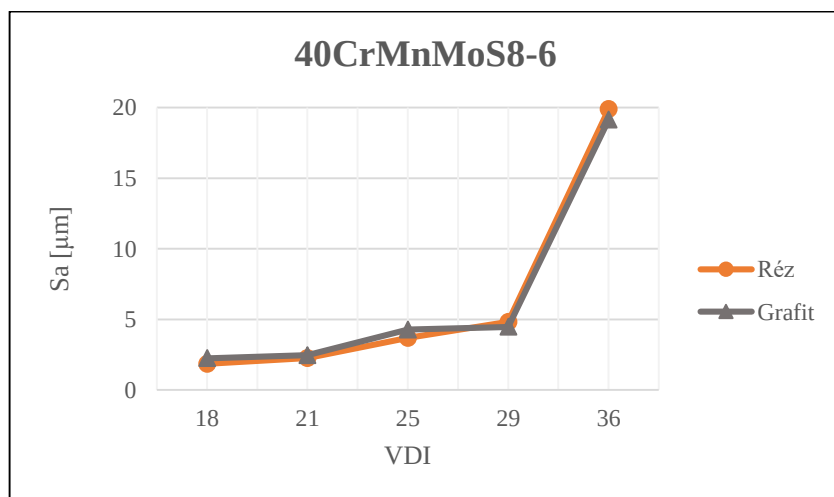
Az 55-58. ábrákon az S_a paraméter alakulása látható a VDI fokozatok függvényében. A görbe jellegét tekintve hasonló megállapítások tehetők, mint R_a esetében, miszerint a szerszámanyagok közötti érdességkülönbség nem számottevő. A C45U acélról elmondható, hogy habár egyes fokozatokban inkább a grafit elektróda teljesített jobban, az összeredményt tekintve a réz elektródával való szikraforgácsolás eredményezett rajta jobb minőségű felületeket. A 40CrMnMo7 acélra is igaz a fokozatonkénti eltérés, viszont itt inkább a grafit elektróda használata vezetett jobb eredményre. A 40CrMnMoS8-6 acélon alacsonyabb VDI fokozaton (VDI 25-ig) a rézzel, magasabb fokozaton a grafittal kaptam kedvezőbb felületeket. Hasonló képet kaptam a 45NiCrMo16 munkadarabról is: VDI 25-ig a réz készített finomabb felületeket, VDI 29-36 fokozatokon pedig szinte értékre pontosan megegyezik a két szerszámanyaggal elért eredmény.



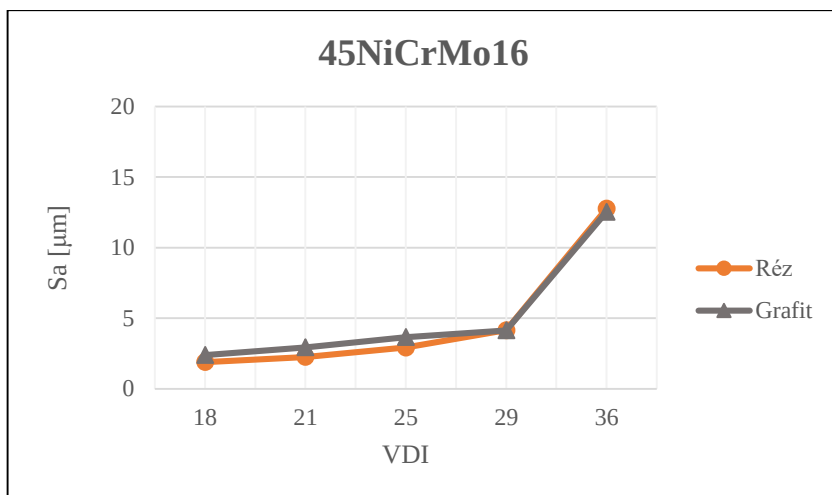
55. ábra Szerszámanyagok hatása az S_a paraméterre C45U acél esetén



56. ábra Szerszámanyagok hatása az S_a paraméterre 40CrMnMo7 acél esetén

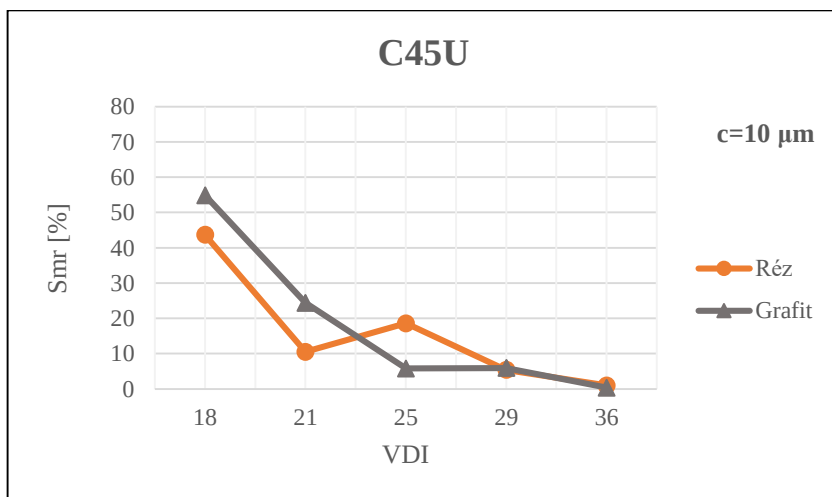


57. ábra Szerszámanyagok hatása az S_a paraméterre 40CrMnMoS8-6 acél esetén

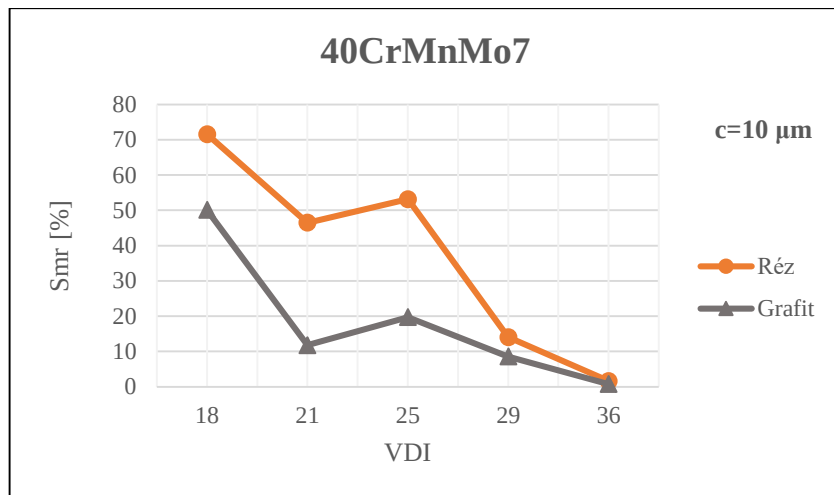


58. ábra Szerszámanyagok hatása az S_a paraméterre 45NiCrMo16 acél esetén

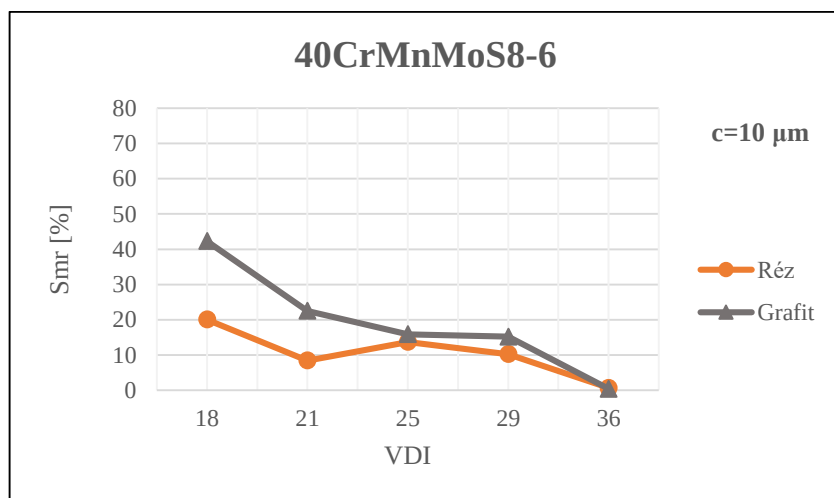
Az 59-62. ábrákon a szerszámanyagok S_{mr} paraméter szerinti összehasonlítását láthatjuk a VDI fokozatok függvényében. A C45U próbadarabon R_{mr} -hez hasonlóan fokozat függő a szerszámanyagok által hozott eredmény, VDI 18-21 és VDI 29-en a grafittal, VDI 25 és 36-on a rézzel érhető el kedvezőbb felületi tulajdonságok. A 40CrMnMo7 anyag mérése közben nagy százalékos értékeket kaptam, melyet minden fokozaton a rézzel értem el. R_{mr} -hez hasonló eredmény született a 40CrMnMoS8-6 felületein is, VDI 25 és 36-on a két szerszámanyag között kevés különbség tapasztalható, de összességében a grafit elektróda szerepelt jobban. A 45NiCrMo16 acél esetén azt tapasztaltam, hogy egy-két kivételtől eltekintve, inkább a grafit szerszámanyag eredményezett kedvezőbb működési tulajdonságokat.



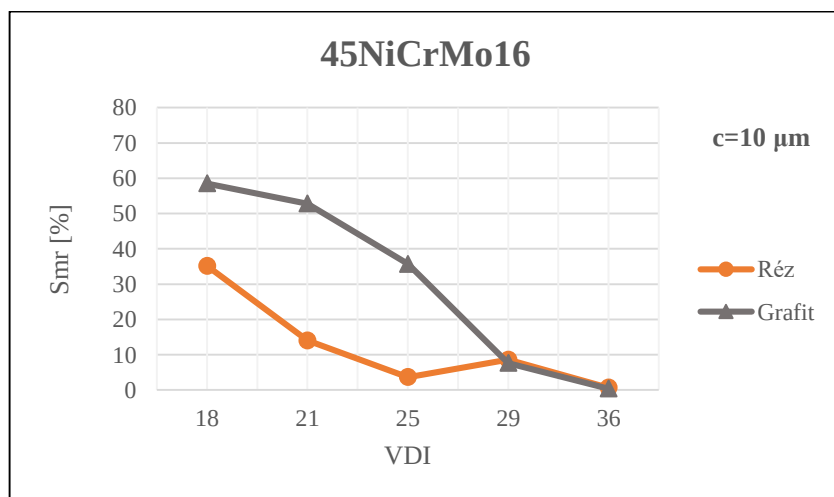
59. ábra Szerszámanyagok hatása az S_{mr} paraméterre C45U acél esetén



60. ábra Szerszámanyagok hatása az S_{mr} paraméterre 40CrMnMo7 acél esetén



61. ábra Szerszámanyagok hatása az S_{mr} paraméterre 40CrMnMoS8-6 acél esetén

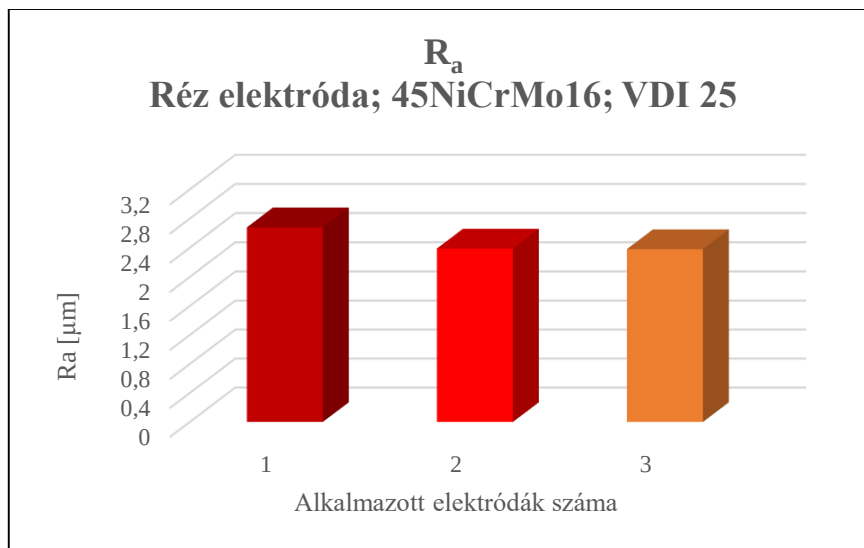


62. ábra Szerszámanyagok hatása az S_{mr} paraméterre 45NiCrMo16 acél esetén

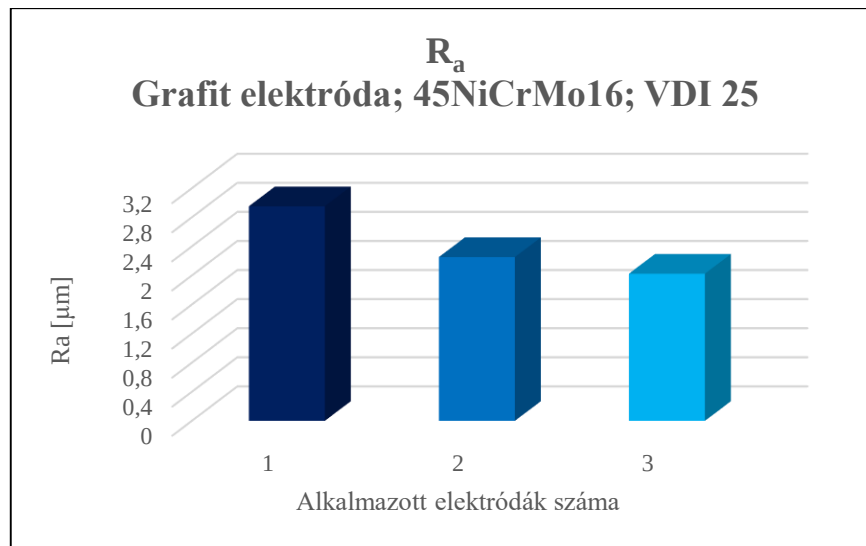
5.6. Az elektródák számának hatása az érdességi és topográfiai paraméterekre

A továbbiakban, a 45NiCrMo16 próbadarab hátoldalára készített üregeken fogom megvizsgálni, hogy az alkalmazott elektródák számának növelése miként befolyásolja a szikraforgácsolás eredményét felületi érdesség szempontjából. A több elektródával való megmunkálást, úgy kell elképzelni, mintha a folyamatot nagyoló és simító szakaszokra osztanánk fel. Ilyenkor a második és harmadik elektróda mindig az öt megelőző elektróda munkáját korrekciózza, tökéletesíti. Ennek köszönhetően lemunkálásra kerülnek azok az anyagrészek is, melyet az előző elektródának a kopás bekövetkezése miatt már nem sikerült leválasztani. Az üregek VDI 25 fokozatban készültek, grafit és réz elektródával egyaránt. Az előző fejezethez hasonlóan R_a , R_{mr} és S_a , S_{mr} paraméterek alakulása adja az összehasonlításom alapját.

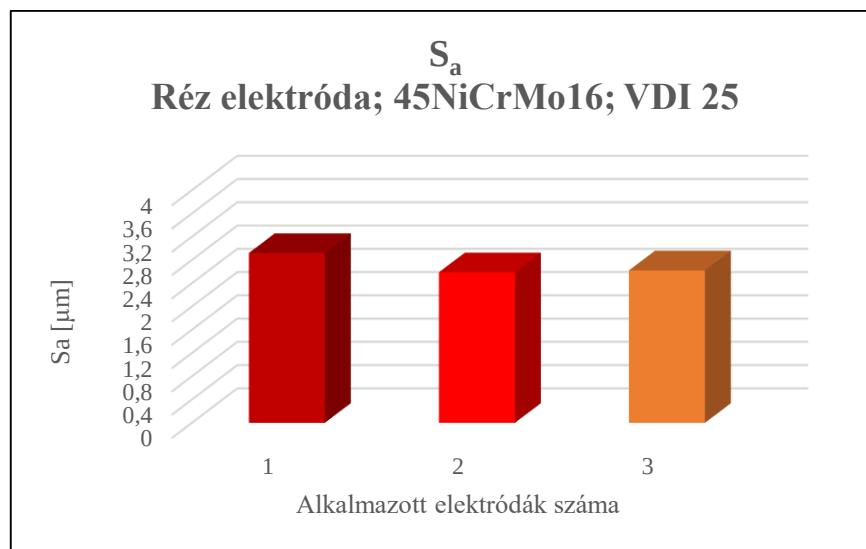
A 63-64. ábrákon R_a , a 65-66. ábrákon pedig S_a alakulását láthatjuk az alkalmazott elektródák számának függvényében, réz és grafit szerszám esetén. Mind a négy grafikonról egyértelműen leolvasható, hogy a legdurvább felületi érdességet az egy elektródával való megmunkálás eredményezte. Tekintve a réz elektródát, R_a és S_a vonatkozásában is megállapítható, hogy a nagyobb érdesség különbségeket az egy és két elektróda közötti eredményekben kaptam, míg két és három elektróda között kevesebb különbségek figyelhetők meg. Ez ugyanúgy elmondható a grafit elektródáról is, viszont R_a esetében, elektródánként jelentősebb érdesség javulást tapasztaltam, mint réznél. Mindkét anyagnál, S_a paraméternél, arra a következtetésre jutottam, hogy egy helyett, két elektróda használata jelentős érdesség javulást von maga után, míg három és kettő elektróda alkalmazása között nem tapasztalható érdemi javulás. Megjegyzendő továbbá, hogy míg az egy elektródával történő szikraforgácsolás után a rézzel, addig két és három elektródával, a grafittal készültek jobb felületminőségek.



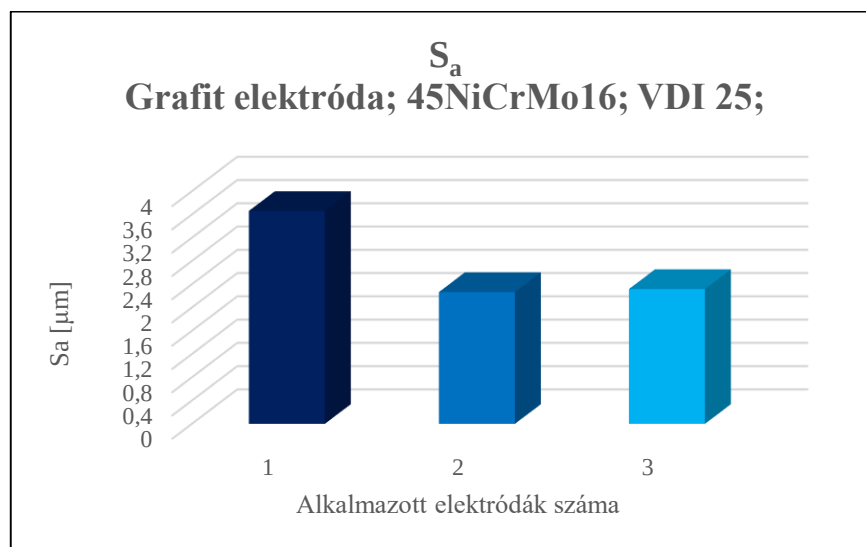
63. ábra R_a paraméter alakulása az elektródák számának növelésével, réz elektróda esetén



64. ábra R_a paraméter alakulása az elektródák számának növelésével, grafit elektróda esetén

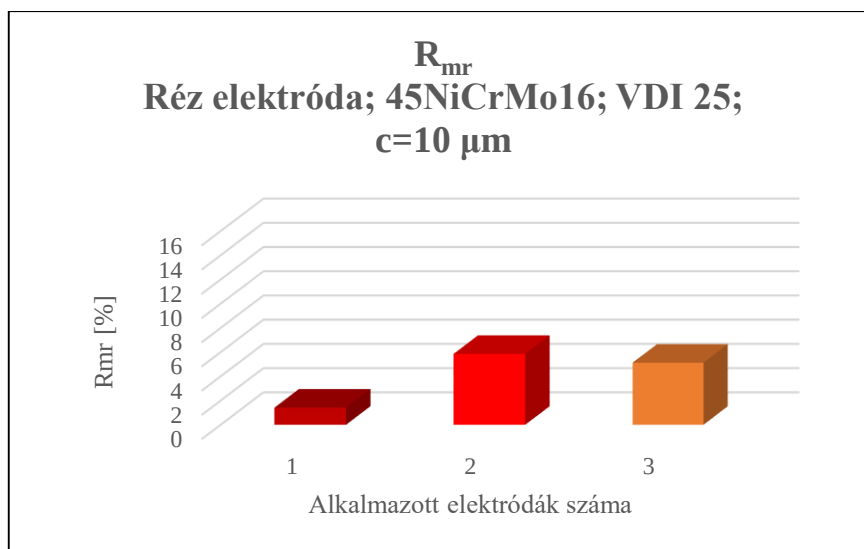


65. ábra S_a paraméter alakulása az elektródák számának növelésével, réz elektróda esetén

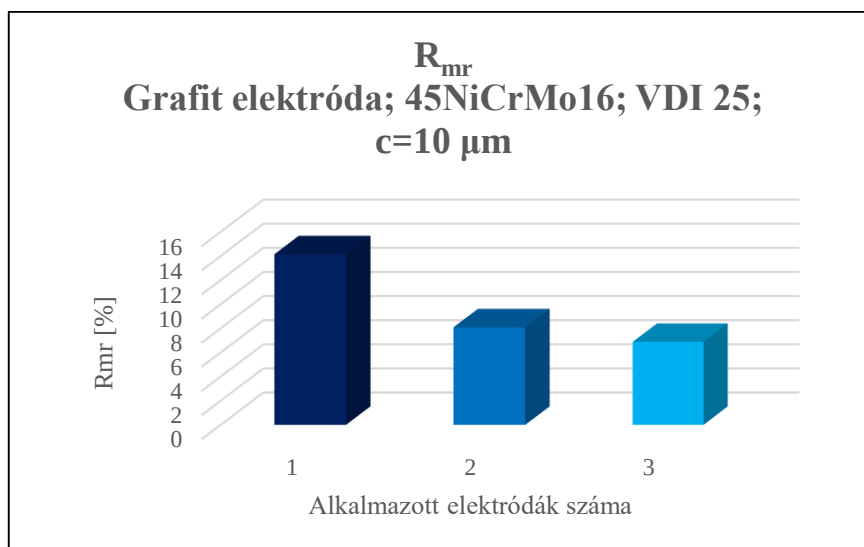


66. ábra S_a paraméter alakulása az elektródák számának növelésével, grafit elektróda esetén

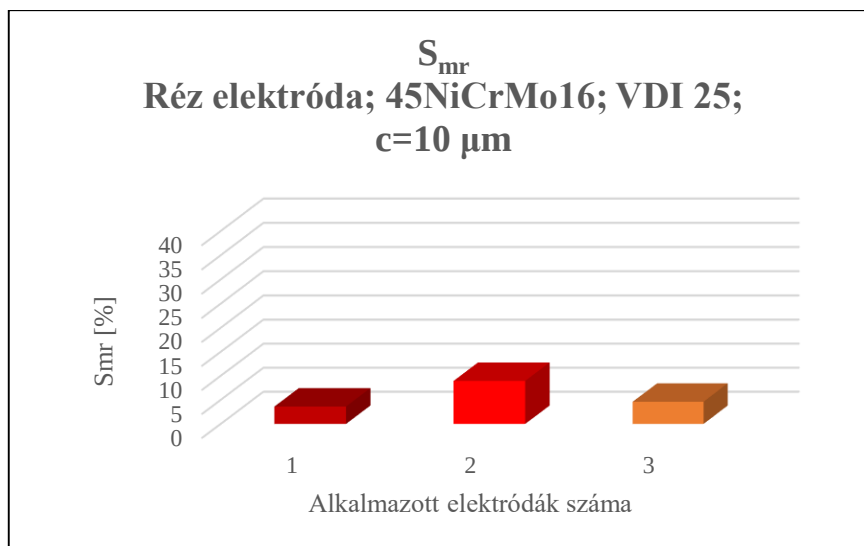
Ugyanezt a vizsgálatot elvégeztem R_{mr} és S_{mr} paraméterekre is. (67-70. ábra). A diagramokról megfigyelhető, hogy az egy réz szerszámmal megmunkált felület különösen gyenge működési tulajdonságokkal rendelkezik VDI 25 fokozaton, amelyet az elektródák számának növelésével sikerült javítani. Ezzel szemben a grafit szerszám egy elektróda alkalmazása után kifejezetten magas százalékos értéket adott. Ennél éppen az ellenkezője tapasztalható, mint réznél: a szikraforgácsoláshoz használt elektródák számának növelése fokozatosan rontotta a felület működési tulajdonságait. Összességében elmondható, hogy a vizsgált anyagminőségen és fokozaton a grafit szerszámmal lehetett elérni kedvezőbb működési és kopási tulajdonságokat.



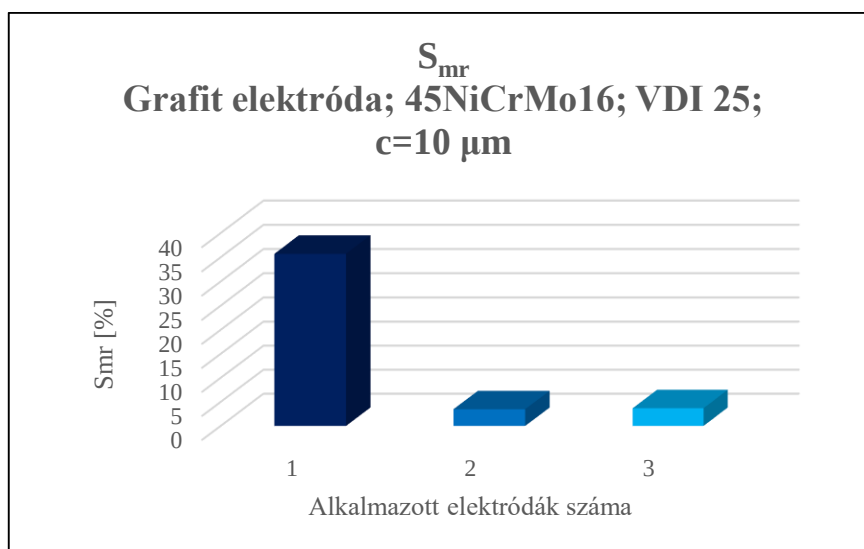
67. ábra R_{mr} paraméter alakulása az elektródák számának növelésével, réz elektróda esetén



68. ábra R_{mr} paraméter alakulása az elektródák számának növelésével, grafit elektróda esetén



69. ábra S_{mr} paraméter alakulása az elektródák számának növelésével, réz elektróda esetén

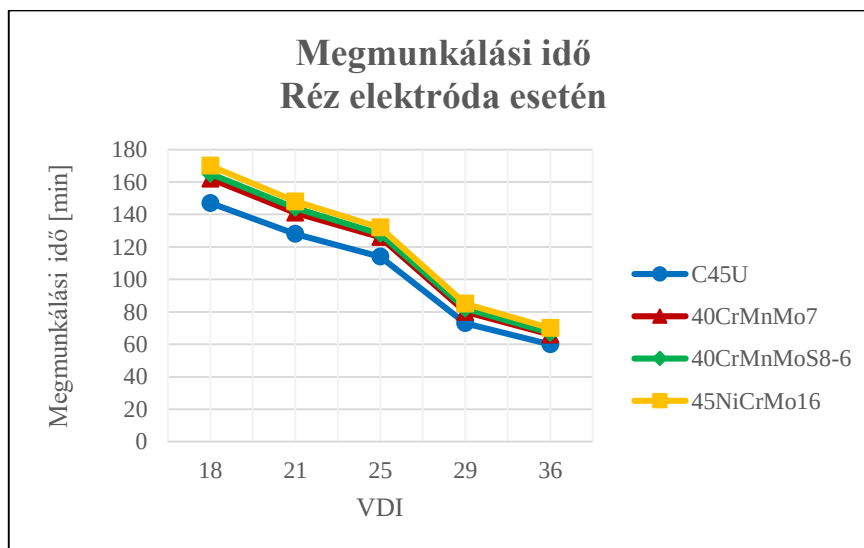


70. ábra S_{mr} paraméter alakulása az elektródák számának növelésével, grafit elektróda esetén

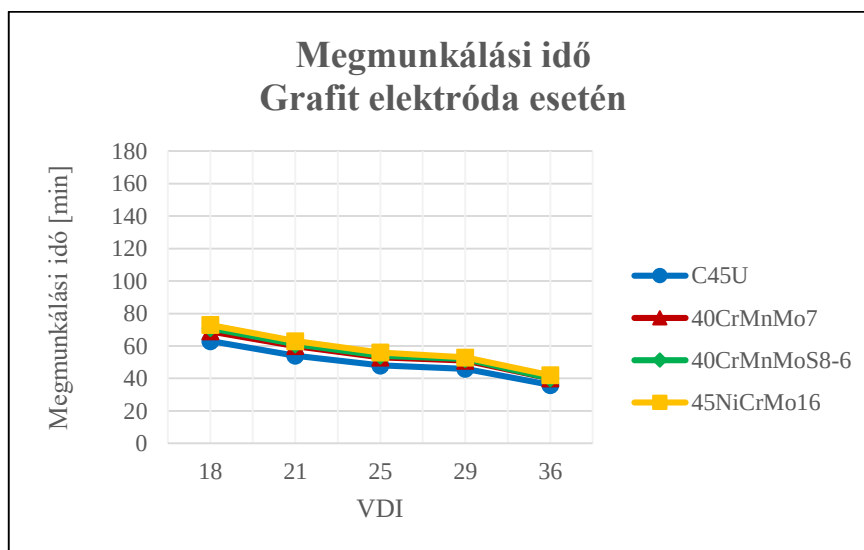
5.7. Termelőkenységi jellemzők vizsgálata

A szikraforgácsolási folyamat termelőkenységére, tehát a megmunkálás teljesítményére az egyes üregek megmunkálási idejéből vonnak le következtetéseket. A 71. és 72. ábrán a négyféle, vizsgált szerszámacél munkadarabon készített üregek megmunkálási ideje látható a VDI fokozatok függvényében, réz és grafit elektródák esetén. Az érdességmérések során már utaltam rá, hogy a VDI fokozatok növelésével egyre durvább felületminőségek állíthatók elő. Ugyanakkor a fokozatok növelésével a megmunkálás ideje egyre jobban csökken, amit a 71. és 72. diagram is kellően tükröz. A szerszámacélok vonatkozásában, mind réz, mind grafit elektródánál azt fedeztem fel, hogy a megmunkált anyag ötvözőinek az aránya kapcsolatban áll a megmunkálási idővel. Minél kevesebb ötvözőt tartalmazott a vizsgált anyag, annál rövidebb ideig tartott a szikraforgácsolása. Ennek megfelelően az ötvöztelen C45U acélra készített üregek megmunkálása tartott a legkevesebb ideig, a legtöbb ötvözőt tartalmazó 45NiCrMo16-ra pedig a legtöbb ideig. Az ábrákból az is leolvasható, hogy az összetételében hasonló 40CrMnMo7 és 40CrMnMoS8-6 anyagminőségek

megmunkálási ideje között viszonylag kevés a különbség. A két szerszámanyagot összevetve, arra a következtetésre jutottam, hogy grafittal jelentősen kevesebb ideig tart a szikraforgácsolási folyamat, mint rézzel. Rézzel 60-170 percre, grafittal 36-73 percre tehető a megmunkálás időtartománya.



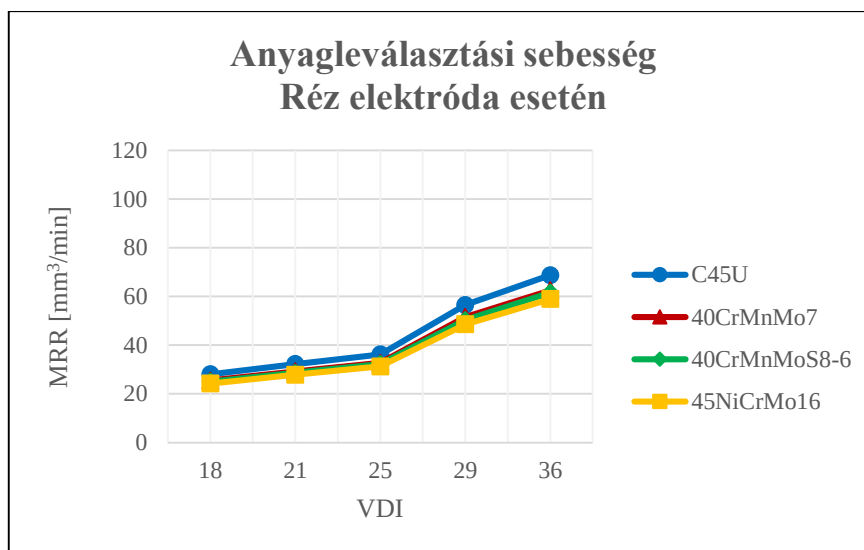
71. ábra A megmunkálási idők alakulása a VDI fokozat függvényében réz elektróda esetén



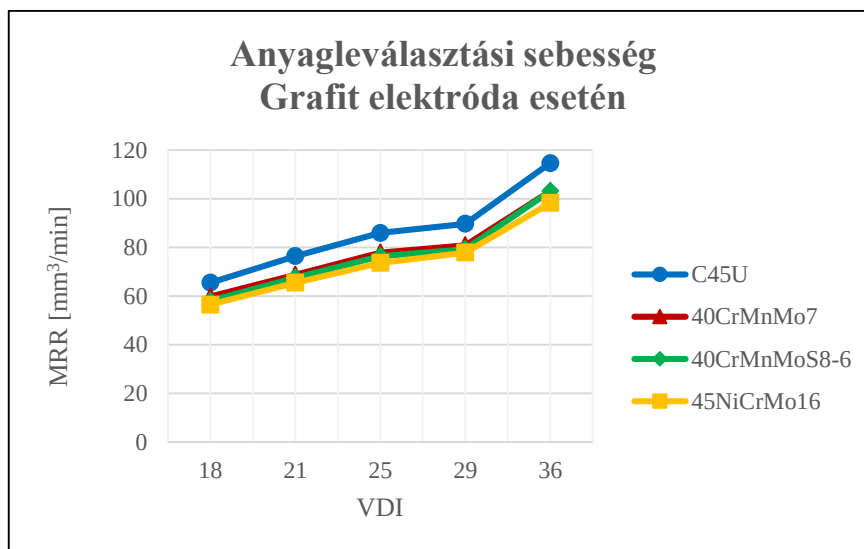
72. ábra A megmunkálási idők alakulása a VDI fokozat függvényében grafit elektróda esetén

A megmunkálási idő adatokat felhasználva minden anyagminőség, minden ürege esetén kiszámoltam a szikraforgácsolás anyagleválasztási sebességét az 1. egyenlet alapján. Az üregenként leválasztott anyagmennyiség térfogata $V = 4125 \text{ mm}^3$ (55x15x5) volt. A 73. és 74. ábrán ezeket az anyagleválasztási sebesség értékeket tüntettem fel a VDI fokozatok függvényében. A diagramokon tisztán látszik, hogy MRR az időeredményekkel összhangban változik. Következtetésként vonható le, hogy a magasabb VDI fokozatokon nagyobb az MRR értéke, azaz a fokozatok növelésével a szikraforgácsolási folyamat egyre termelékenyebb lesz. A megmunkálás termelékenysége továbbá függ a megmunkálandó anyagminőségtől is: acél munkadarab esetén nagyobb hatékonyság érhető el az ötvözetlen

és a kevesebb ötvözőt tartalmazó anyagoknál. Az időeredményekből már következtethető volt, hogy a grafit szerszám alkalmazásával, sokkal termelékenyebbé tehető az eljárás, mint réz elektródával.



73. ábra Az anyagleválasztási sebességek összehasonlítása réz elektróda esetén

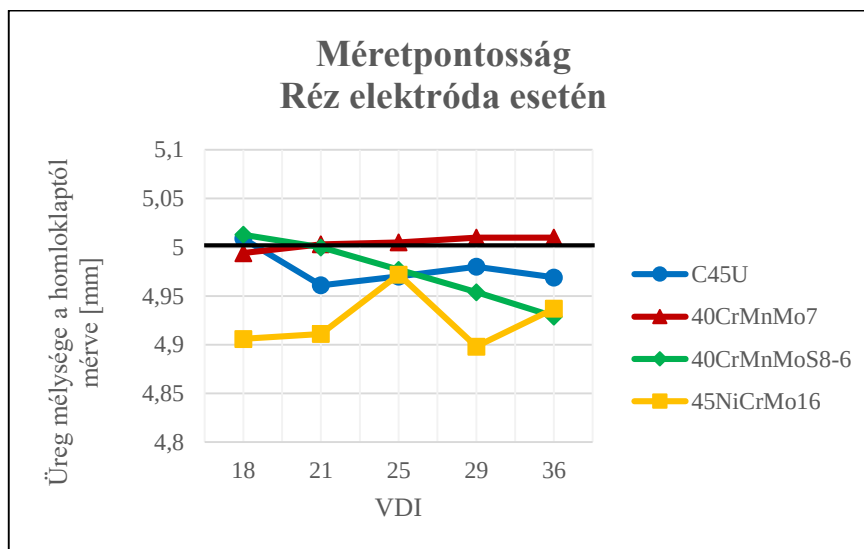


74. ábra Az anyagleválasztási sebességek összehasonlítása grafit elektróda esetén

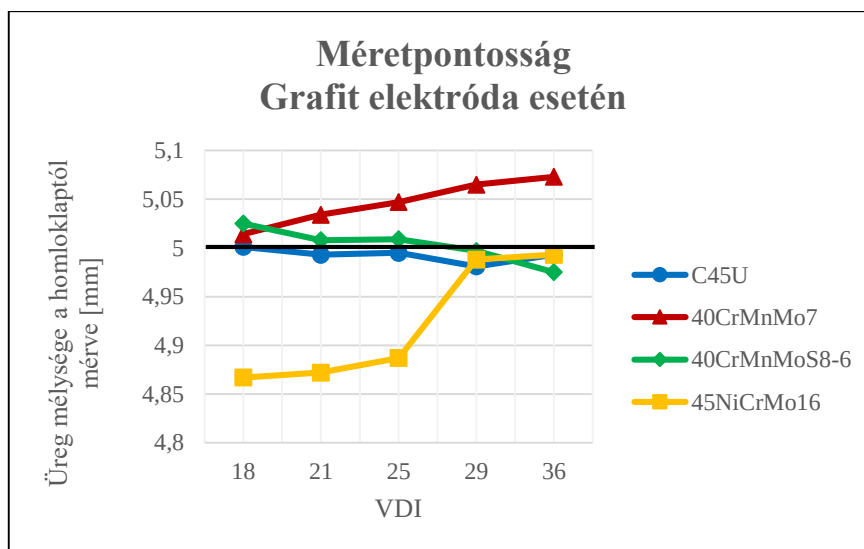
5.8. Szerszámacélok szikraforgácsolásának hatása a méretpontosságra

A 75-76. ábrákon, a négyféle szerszámacélon előállított üregek mélység irányú méretei láthatók az egyes VDI fokozatokban. Az üregek névleges mérete 5 mm volt, melyet mindkét diagramon vonallal jelöltem. Ha megnézzük a mérési adatok alapján készített görbék karakterisztikáját a kétféle szerszámanyag, illetve a négyféle szerszámacél vonatkozásában, akkor jól látható, hogy teljesen más képet festenek a két diagramon. Megállapítható továbbá, hogy sem a VDI fokozatok változtatása, sem a munkadarabanyagok változtatása, illetve az acélokban előforduló ötvözők aránya sem befolyásolja a mérési eredményt. Ebből arra következtetünk, hogy az általam vizsgált paraméterek nem gyakorolnak hatást a szikraforgácsolás méretpontosságára. Mivel a méreteltérések egy-két kivételtől eltekintve

tizedes vagy százados nagyságrendűek, így valószínűsíthető, hogy befogási hiba vagy a szerszámelektroda kopása okozhatja azokat.



75. ábra Méretpontosság vizsgálata réz elektróda esetén



76. ábra Méretpontosság vizsgálata grafit elektróda esetén

6. Következtetések, összegzés

A TDK dolgozatomban ismertetett kísérleti kutatómunka eredményeit összegezve, a szikraforgácsolással megmunkált, különböző ötvöztetésű szerszámacélok összehasonlítására irányuló kísérletek alapján az alábbi megállapítások tehetők:

- Az amplitúdó jellegű érdességi paraméterek (R_a és R_z) tekintetében elmondható, hogy a vizsgált tartományon, az egyes szerszámacélok között csekély érdességkülönbségek tapasztalhatók. R_a esetében megállapítható, hogy a legjobb minőségű felületek, mind réz, mind pedig grafit elektródával, a C45U és a 40CrMnMo7 acél munkadarabon készültek. A legkedvezőtlenebb felületeket a 40CrMnMoS8-6 acél szikraforgácsolása eredményezte. R_z paraméter R_a -val teljes

analógiában változott, viszont kevésbé egyértelmű eredményeket hozott. Réz elektróda esetén az amplitúdó paraméterek $R_a = 1,4-9 \mu\text{m}$, $R_z = 15,8-62,6 \mu\text{m}$, grafit esetén $R_a = 1,5-10,5 \mu\text{m}$, $R_z = 16,7-70,3 \mu\text{m}$ között változtak.

- Szikraforgácsolt felületek esetén, az R_z egyenetlenség magasság és az R_a átlagos érdesség változására, a mérési eredmények alapján az $R_z \approx (6 \div 13) \cdot R_a$ arány írható fel.
- Az R_{sm} egyenetlenségek közepes hullámhossza vonatkozásában is elmondható, hogy az egyes szerszámacélok közötti különbségek nem számottevők. Szerszámanyagtól függetlenül, ezen paraméter szerint nem állapítható meg pontosan, melyik szerszámacél szikraforgácsolásakor születtek a legkedvezőbb és a legkedvezőtlenebb felületek.
- Az amplitúdó és a térköz paraméterek alapján megállapítható, hogy a VDI fokozatok növelésével romlik a felületi érdesség értéke, egyre durvább felületeket kapunk.
- A $c = 10 \mu\text{m}$ mélységben meghatározott anyaghányad paraméter (R_{mr}) szerint VDI 18 fokozaton érhető el a legjobb működési és kopási tulajdonságok, melyek a fokozatok növelésével folyamatosan romlanak, továbbá a fokozatok növelésével az egyes szerszámacélok elérhető eredmények is – egymáshoz képest – egyre kisebb különbséget mutatnak. Réz elektródával a legkedvezőbb tulajdonságok a 40CrMnMo7, grafit elektródával a C45U és a 45NiCrMo16 anyagminőségen érhetőek el. A legalacsonyabb százalékos értéket, VDI 18 fokozaton, a 40CrMnMoS8-6 acél felületein kaptam, a többi fokozatban mindig más és más eredmény született. Réz elektródával $R_{mr} = 0,9-56,3\%$, grafittal $R_{mr} = 0,8-59,5\%$ tartományban mozgott.
- Az R_{sk} (ferdeségi) és R_{ku} (lapultsági) paraméterek alapján készített topológiai térképekről következtetésként vonható le, hogy réz szerszámanyaggal a 40CrMnMoS8-6 és a 40CrMnMo7, grafittal a 40CrMnMoS8-6 és a 45NiCrMo16 acélok szikraforgácsolása eredményezi a legkedvezőbb felületi tulajdonságokat. Megvizsgálva a szakirodalom által, a szikraforgácsolásra meghatározott területet, elmondható, hogy a legkedvezőbb tulajdonságokat hozó mérési adatok javarészt a területen kívülre estek.
- A felülettopográfiai paraméterek közül, S_a és S_z 2D-s megfelelőikkel hasonló módon változtak. Ezek szerint a legfinomabb felületek C45U, 40CrMnMo7 és 45NiCrMo16 acélokon érhetőek el, a legdurvábbak pedig a 40CrMnMoS8-6 acél felületein. Réz elektróda esetén az értékek $S_a = 1,6-20 \mu\text{m}$, $S_z = 15,3-95,3 \mu\text{m}$, grafit esetén $S_a = 1,5-19,1 \mu\text{m}$, $S_z = 17-115 \mu\text{m}$ között változtak.
- S_{mr} anyagtérfogati hányad vonatkozásában ($c = 10 \mu\text{m}$ mélységben mérve), a legjobb működési tulajdonságok 40CrMnMo7 és 45NiCrMo16 anyagminőségek szikraforgácsolása során érhetőek el.
- A szerszámanyagok hatásának vizsgálata során, R_a és S_a paraméterek tekintetében, a réz és a grafit elektróda között nem számottevők az érdességkülönbségek, mely mind a négy szerszámacélról megállapítható. R_a vonatkozásában, általában – a VDI 29-es fokozat kivételével – a réz elektródával való szikraforgácsolás hozott jobb eredményt az acélok felületein. S_a esetén, minden acélon más-más elektróda anyag hozta jobban a kívánt jellemzőket, illetve sokszor VDI fokozat függő volt, hogy a grafit vagy inkább a réz teljesített jobban a felületi érdesség szempontjából.

- R_{mr} és S_{mr} paraméterek szerint, C45U acélon grafit, 40CrMnMo7 acélon rézzel, 45NiCrMo16 acélon grafit, 45NiCrMo16 acélon grafit készültek a kedvezőbb kopási tulajdonságú felületek. 40CrMnMoS8-6 acélon pedig VDI fokozat függő melyik elektróda hozza a jobb eredményeket.
- A megmunkálás során alkalmazott elektródák számának növelésével, R_a és S_a paraméterek vonatkozásában megállapítható, hogy két elektróda használata jelentősebb felületi érdesség javuláshoz vezet az egy elektródás megmunkálással szemben, míg három és két elektróda között nem született számottevő érdességkülönbség.
- Az elektródák számának növelése, R_{mr} és S_{mr} tekintetében, réz elektródánál egyre jobb, grafit elektródánál egyre rosszabb működési tulajdonságú felületeket eredményezett.
- A vizsgált szerszámacélok szikraforgácsolása esetén, az anyagban előforduló ötvözők mennyisége határozta meg a megmunkálási idő nagyságát. Ezek szerint az ötvözetlen C45U acél megmunkálása tartott a legrövidebb ideig, a legtöbb ötvözőt tartalmazó 45NiCrMo16 acél pedig a leghosszabb ideig. Ezzel összhangban, a termelékenység szempontjából elmondható, hogy a C45U acélon érhető el a legnagyobb, a 45NiCrMo16 acélon a legkisebb anyagleválasztási sebesség. Mind a megmunkálási idő, mind a termelékenység tekintetében a grafit szerszámanyag teljesített jobban.
- Az üregek méreteltérésének vizsgálatáról az a következtetés vonható le, hogy sem a megmunkált anyag típusa, sem a VDI fokozatok változtatása, sem az eltérő szerszámanyagok alkalmazása nincs hatással a szikraforgácsolás méretpontosságára.

A kísérletek alapján levont következtetésekből elmondható, hogy a legfinomabb felületeket az ötvözetlen C45U és a legkevésbé ötvözött 40CrMnMo7 acél szikraforgácsolásakor értem el. Ezekon kívül, bizonyos esetekben a 45NiCrMo16 felületein is értem el jó felületminőségeket, de ezt az acélt inkább a létrehozható, kedvező működési és kopási tulajdonságok miatt érdemes szikraforgácsoláskor alkalmazni. Az esetek nagy részében, a 40CrMnMoS8-6 acélon értem el a leggyengébb felületi jellemzőket, ezért ez az anyagminőség szikraforgácsolásra kevésbé javasolt. Az elektróda anyagok tekintetében, arra az eredményre jutottam, hogy szerszámacéltól, illetve alkalmazni kívánt VDI fokozattól függ, hogy a réz vagy a grafit elektródával érdemes elvégezni a szikraforgácsolási folyamatot. A felületi érdesség javítása érdekében, érdemes a megmunkálást két elektródával elvégezni, viszont amennyiben a szikraforgácsolt felület esetén a működési tulajdonságok kedvező értéke is fontos szempont, abban az esetben csak réz elektródánál javasolt a több elektróda alkalmazása. A rövidebb megmunkálási idő, tehát a nagyobb termelékenység megvalósítása céljából, amennyiben lehetséges, célszerű a megmunkálást grafit elektródával végezni. Az elvégzett kutatásaim rávilágítottak arra is, hogy a tapasztalatok okainak tisztázása további kutatások elvégzését igényli.

7. Köszönetnyilvánítás

Munkám befejezéseként szeretném megköszönni a Gyártástudományi Intézet támogatását, hogy biztosították a munkámhoz szükséges feltételeket.

Külön köszönet Dr. Maros Zsolt egyetemi docensnek, aki ezen téma iránt felkeltette az érdeklődésemet és szakmai tanácsaival támogatott.

Megköszönöm Nagy Antal mérnöktanárnak a tanácsait és a munkám során nyújtott segítséget.

Szeretném megköszönni a Viessmann Modellgyártó Kft.-nek, hogy biztosították számomra a kísérlet elvégzéséhez szükséges eszközöket és feltételeket.

Külön köszönet a Viessmann Modellgyártó Kft. szerszámkészítő csoportjából Németh Lászlónak és Kormos Richárdnak, akik szakmai tudásukkal és tanácsaikkal segítették a kísérletek megvalósítását.

Irodalomjegyzék

- [1] Gergő Ferenc: Szikraforgácsolás; Műszaki Könyvkiadó; Budapest; 1986
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_discharge_machining
- [3] <https://www.mechanicalfunda.com/2017/02/advantage-disadvantage-edm.html>
- [4] K.H. Ho, S.T. Newman: State of the art electrical discharge machining (EDM); International Journal of Machine Tools & Manufacture; Volume 43; Issue 13; 2003; 1287-1300
- [5] Berkes Rudolf – Erdődi László: Megmunkálások III.; Tankönyvkiadó; Budapest; 1985
- [6] Bernd M. Schumacher: After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed; Journal of Materials Processing Technology; 149 (1-3); 2004; 376-381
- [7] Dudás Illés: Gépgyártás-technológia I. (3. kiadás); Műszaki Kiadó; Budapest; 2011
- [8] T. Czelusniak, C.F. Higa, R.D. Torres, C.A.H. Laurindo, J.M.F. de Paiva Júnior, A. Lohrengel, F.L. Amorim: Materials used for sinking EDM electrodes: a review; Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering; 41:14; 2019
- [9] J. Jeevamalar, S. Ramabalan: Die sinking EDM process parameters: a review; International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research; Vol. 4; No. 1; 2015
- [10] K. Ojha, R.K. Garg, K.K. Singh: MRR improvement in sinking electrical discharge machining: a review; Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering; Vol. 9; No. 8; 2010; 709-739
- [11] G. Kibria, B. Bhattacharyya: Microelectrical discharge machining of Ti-6Al-4V: Implementation of innovative machining strategies; Microfabrication and Precision Engineering; 2017; 99-142
- [12] Fekete, V., Maros, Zs.: Tömbelektrodás szikraforgácsolás kísérleti vizsgálata mikrogeometriai jellemzők alapján; Multidiszciplináris tudományok; 11 (3); 2021; 184-190
- [13] VDI 3400: Elektroerosive Bearbeitung, Begriffe, Verfahren, Anwendung; VDI-Richtlinien; 1975
- [14] K. Peta, T. Bartkowiak, P. Galek, M. Mendak: Contact angle analysis of surface topographies created by electric discharge machining; Tribology International; Vol. 163; 2021
- [15] Dr. Szabó András – Kozma István: Gyártóeszközök tervezése és gyártása; Széchenyi István Egyetem; 2011
- [16] <https://cnctar.hobbycnc.hu/nyarfa/EDM/Szikraforg%E1csol%E1s.pdf>

- [17] Dr. Maros Zsolt: A felületi mikrogeometria és a kopási viselkedés kapcsolata; tanulmány; Miskolc; 2013
- [18] Horváth Richárd: Öntött alumínium ötvözetek forgácsolhatóságának elemzése külső hengeres felületek finomsztergálásánál; Doktori (PhD) disszertáció; 2015
- [19] Zsolt F. Kovács, Zsolt J. Viharos, János Kodácsy: Determination of the working gap and optimal machining parameters for magnetic assisted ball burnishing; scientific article; 2017
- [20] Böhler Kereskedelmi Kft.: Szerszámacélok, nemesacélok; online katalógus; 2009
- [21] Inox Service Hungary Kft.: 1.2311 / 40CrMnMo7 / P20; online technikai adatlap
- [22] <https://www.astmsteel.com/product/p20-steel-plate-1-2311-3cr2mo-mold-tool-steel/>
- [23] Inox Service Hungary Kft.: 1.2312 / 40CrMnMoS8-6 / P20+S; online technikai adatlap
- [24] <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=d3765a5cef4f42280ba18fbb083cb10&n=1&ckck=1>
- [25] Inox Service Hungary Kft.: 1.2767 / 45NiCrMo16 / 6F7; online technikai adatlap
- [26] <https://www.steelgr.com/Steel-Grades/Tool-Steel/1-2767.html>
- [27] Evolt Kft: Precíziós köszörült/finommart lapok, hasábok és rudak szerszámacélból; online katalógus; 2019
- [28] <https://www.steelgr.com/Steel-Grades/Tool-Steel/1-1730.html>
- [29] Lamineries Matthey SA: Cu-ETP; online technikai adatlap; 2014
- [30] MERSEN: Graphite grades for electrical discharge machining (EDM); online katalógus; 2020