

A kombinált és a rotációs eljárás vizsgálata keményesztergálásnál (Kutatási eredmények összefoglalója)

A termékek tartósságának és megbízhatóságának növelése iránti igények egy része miatt az alkatrészek keményfelületeinek száma is növekszik. E felületek gyakran a nagy terhelésű, edzett gépalkatrészekben találhatóak. Funkcionális viselkedésüket meghatározóan befolyásolja a technológia befejező művelete, a készre-munkáló eljárás. Ebben a megmunkáló eljárásban kell biztosítani, hogy a megmunkált alkatrészek/felületek a magas minőségi követelményeket igénylő működési előírásoknak, a költséghatékonyság folyamatos növelése mellett feleljenek meg.

Mi az ilyen felületek megmunkálásánál alkalmazható két eljárás (megmunkálási) technológia kutatásához és fejlesztéséhez kívántunk a projektben megfogalmazott célkitűzések teljesítésével hozzájárulni. Azt terveztük és vállaltuk, hogy a hatékony anyagválasztást és a működési követelményeknek jobban megfelelő felület kialakítást egyazon szerszámgepen, egy felfogásban a ráhagyás szükséges minimumát keményesztergálással biztosítva köszörüléssel (kombinált eljárás), és/vagy a szerszám élén folyamatosan változó érintkezéssel (rotációs előtolással) biztosítjuk. Ennek megfelelően a kutatás a két eljárás folyamatjellemzőinek valamint azokon keresztül a munkadarabok pontosságára és felületminőségére gyakorolt hatásának feltárására és tudományos elemzésére irányult. A kutató munkák során elméleti és kísérleti vizsgálatokkal tanulmányoztuk a megmunkálások azon feltétel rendszerét, melynek eredményeként a munkadarabok minőségét (pontosság, érdesség, felületi réteg állapota, stb.) és a folyamat megbízhatóságát olyan szinten biztosíthatjuk, amely után az alkatrészek jobban terhelhetőek, kopásállóbbak és nagyobb élettartamúak lehetnek.

Kutatómunkánkat a projekt indításakor elkészített „Kutatási terv” szerint végeztük. A vállalt feladatokat teljesítettük, azokról az évenkénti beszámolóban feladatpontként beszámoltunk. A kutatási eredményeket hazai és külföldi konferenciákon, hazai és külföldi lektorált folyóiratokban, kiadványokban, könyvfejezetben rendszeresen, (összesen 102 alkalommal) közzétettük. Az eredmények részben felhasználásával 1 PhD értekezés elkészült és megvédésre került, egy másik pedig a közeljövőben kerül megvédésre. Mindezek figyelembevételével foglaljuk össze eredményeinket.

1. Az eljárásokat és a forgácsleválasztást meghatározó sajátosságok feltárása

A keményesztergálást két szempontból elemeztük és vizsgáltuk. Egyrészt, mint a kombinált eljárás első lépését, másrészt mint egy speciális kinematikát és szerszám-geometriát alkalmazó (rotációs előtolású) eljárást. A kombinált eljárás maga is két művelet-elemből áll: egyik a keményesztergálás, a másik pedig a köszörülés. A keményesztergálás és a köszörülés között sok a hasonlóság, de ezek mellett nagyon lényeges különbségek is vannak. Közös a két megmunkálás között a nagysebességű anyagválasztás, a forgácsképzés magas hőmérséklete, a kis forgácskeresztmetszet, a megmunkált felületeken a fehér réteg képződésének lehetősége, valamint azonos az elérhető pontosság és érdesség is. Különbözik viszont a létrehozható felület topográfiája, a felszíni réteg állapota, a környezetterhelés, a forgácsoló él geometriája, a munkadarab és a szerszámél érintkezése és az érintkezés folyamatossága. Az egyezőségek az alternatív alkalmazás lehetőségét, a különbözőségeket pedig ennek kizárását jelenthetik.

A *kombinált eljárás* vizsgálatánál két, korábbi eljárás olyan kombinációjának megvalósítására törekedtünk, ahol a célt a korábbi változatokkal végzett forgácsleválasztás tudományos elemzésével (tanulmányozásával és vizsgálatával, feltárásával) határoztuk meg (szerszám élgeometria kialakítása, termelékenység, felületi réteg tulajdonságai, a második lépéshez szükséges minimális ráhagyás, stb.), a forgácsleválasztás feltételeit. Ezekkel biztosítható az egy gépen, egy felfogásban végzett esztergálási és köszörülési megmunkálás úgy, hogy a keményesztergálás pontossága tegye lehetővé a felület előírt geometriájának és minőségének biztosítását a következő műveletelemben végzett köszörüléssel.

A *rotációs eljárás*nál – más kinematikai és geometriai feltételek közötti esztergálással – részletes kinematikai elemzéseket és a szerszámgeometriai vizsgálatokat is végezniünk kellett. Továbbá a lehetséges bázis-szerszámokat, a konstrukciós elveket és a megvalósítható szerszámgeometriákat is.

Közlemények: [2, 3, 4, 5, 6, 19, 20, 36, 55, 66]

2. Rotációs eljárás vizsgálata

Első lépésben az eljárást elhelyeztük az „esztergálás” forgácsolási főcsoportban és a tudományág tradicionális elvei szerint pontosítottuk, elemeztük a jellegzetes munkadarab-felületekhez. Pontosítottuk, ellenőriztük a külső hengeres felületek (KHF) kialakításához értelmezhető „Weisser” szerinti szakirodalmi ajánlásokat és számítási eredményeket. Kidolgoztuk - első változatban - a „Weisser-féle rotációs esztergálás” belső hengeres felület (BHF) kialakítására érvényesíthető gyártásgeometriai modelljét és a fontosabb összefüggéseket levezettük.

A geometriai alaphelyzet, KHF-esetén, két kötött helyzetű kitérő egyenes, amelyeket normáltranszverzális két össze. Egyik egyenes a tengely középvonala, másik a szerszám élvonala, a normáltranszverzális két metszéspont közötti része pedig a készülő hengeres felület sugara. A geometria alaphelyzetet ki kell még egészíteni két forgómozgással, hogy anyagleválasztás történjen az előírt átmérő biztosítása céljából. Az egyik a forgácsolósebesség (v_c), a munkadarab forgatása, a másik a szerszámélm lassú forgómozgása. A szerszámélm mint egyenes vonal mintegy 30... 45 fokos szöget zár be a tengelyvonalat képező másik egyenessel. A geometriai és kinematikai helyzet alapján meghatároztuk a szerszámot jellemző szögeket és síkokat.

Közlemények: [40, 55, 66, 67, 73]

2.1. Kinematikai-matematikai modellezés

A rotációs előtolású esztergálás kinematikai viszonyainak vizsgálatát kétféle módszerrel végeztük. A kutatás kezdetén trigonometrikus összefüggésekkel vizsgáltuk a geometriai viszonyokat, míg később áttértünk a komplexebb matematikai-analitikai elemzésekre. A számításoknál figyelembe vettük, hogy ha a szerszámélm folyamatosan változó érintkezéssel kívánjuk biztosítani a hatékony anyagleválasztást, akkor az alkatrész felülethez, mint a forgástest alkotójához viszonyítva a ferde helyzetű szerszám főél, működés közbeni lassú forgása azt eredményezi, hogy minden pillanatban a főél más-más pontja végzi az anyagleválasztást.

A korábbi jelentésekben vázolt geometriai és kinematikai helyzet alapján meghatározott összefüggések segítségével megadtuk a szerszámélm statikus és működő szögeit, ezek alapján rögzítettük a teljes szerszámgeometriát; az élvonal minden egyes pontjának forgácsolási idejét.

A vizsgálat másik módszerét egyrészt az motiválta, hogy a szerszámélm nemcsak egyenes vonal, de csavarvonal is (belső hengeres felület esetén csak az) lehet. Másrészt erre a szakirodalomban csak közelítő számítások találhatók. A rotációs esztergálás viszonyainak egzakt leírását egy megfelelően definiált geometriai-kinematikai modell matematikai leírásával is elvégeztük, B. A. Perepelica módszerét felhasználva. Ennek lényege, hogy a rendszer elemeihez koordináta rendszereket rendel, és az ezek közötti kapcsolatokat leírja.

Rotációs esztergálásra értelmeztük a koordinátarendszereket, megadtuk a mozgásviszonyokat, és meghatároztuk a rendszerek között kapcsolatot teremtő transzformációs egyenleteket. Ezek segítségével a modellben értelmezhetővé váltak a rotációs esztergálás fő kinematikai jellemzői: a munkadarab fordulatszám, a szerszám fordulatszám, valamint a szerszám tengelyirányú (axiális) előtolása. A kidolgozott kinematikai-matematikai modell általános érvényű, gyakorlatilag bármely esztergáló eljárás geometriai-kinematikai leírására alkalmas.

Meghatároztuk a megmunkált felület egyenletét. Ennek ellenőrzésére kísérleteket végeztünk, melyek igazolták a modell alkalmazhatóságát a megmunkálás geometriai leírására.

A forgácsleválasztás a szerszám nagyon lassú és a munkadarab gyors forgó sebesség szintű-mozgásával következik be. A fogásvétel értékét a szerszám és a munkadarab sugara, valamint a szimmetriatengelyek távolságával határoztuk meg. Bemutattuk, hogy a megmunkálásnak a leválasztott forgácskeresztmetszet alapján három szakaszát lehet megkülönböztetni: a bekezdési, az állandósult és a kifutási szakaszt. Az első és a harmadik esetben a forgács keresztmetszete folyamatosan változik. Meghatároztuk mindhárom szakasz a legfontosabb paramétereit, a szükséges analitikai egyenletrendszer, majd a peremfeltételek definiálását követően elvégeztük a szükséges számításokat. Kiemelt feladatunk volt az eljárás forgácsolás elméleti jellemzőinek kidolgozása, a kinematikai jellemzők határértékeinek kijelölése és kapcsolata a megmunkálandó felülettel.

Közlemények: [40, 55, 66, 67, 73, 81, 82, 83, 84]

2.2. A szerszámok konstrukciója és élgeometriája

A kinematikai-matematikai elemzéseinknél a szerszámélm vagy egyenes vonal, vagy pedig csavarvonal volt. A rotációs esztergálásnál alkalmazott szerszámok kialakításánál megvizsgáltuk a lehetséges bázis-szerszámokat, a konstrukciós elveket és a lehetséges szerszámgeometriákat. A kinematikai viszonyok és a szerszámok elsődleges áttekintése tette lehetővé a forgácsképződés körülményeinek vizsgálatát, a forgácsméretek kiszámítását, a közepes forgácsvastagság és ennek alapján a forgácsolóerő meghatározását.

Közlemények: [40, 93, 102]

3. A kombinált eljárás elemzése és annak módszerei

A kombinált eljárás első művelet-elemében a keményesztergálás kutatása azon feltételek meghatározására irányult, amelyekkel a köszörüléshez képest többszörös termelékenység valamint az önköltség csökkentése biztosítható. Ezen túl, eljárás specifikus elemzéseket és vizsgálatokat is végeztünk. Az első: a rotációs esztergálás (szerszám és mozgásviszonyok) alkalmazása kombinált eljárás

első műveletében. Megvizsgáltuk a lehetséges bázis szerszámokat, kidolgoztuk a konstrukciós elveket, meghatároztuk az alkalmazható szerszámgeometriát.

A második: a ráhagyások minimalizálása, köszörülés előtt. Az egybefogás a befogási hiba elmaradása és az elmaradó bázisváltás miatt csökkenthető a köszörülési ráhagyás mértéke. Minimális értékét az alkatrész pontossága (mérethiba, köralak hiba, hengeresség) és az elérhető érdességi értékek alapján határoztuk meg. Ehhez speciális foltképző eljárást dolgoztunk ki a kísérleti vizsgálatokhoz. Megállapítottuk, az esztergálási R_{max} függvényében, a különböző elvárásoknak megfelelő minimális köszörülési ráhagyás értékeket. Ennek segítségével jelentős fődíj megtakarítást értünk el.

A harmadik vizsgált terület a korongszabályozás gyakoriságának meghatározása, csökkentése. Mérési módszert dolgoztunk ki, melynek segítségével az érdesség és a köralak hiba folyamatos mérésével megállapítottuk azokat a forgácsolási adatokat, amelyekkel a szabályozás gyakorisága felére, harmadára csökkenthető.

Közlemények: [3, 9, 19, 20, 35, 38, 44, 47, 56, 64, 74, 86]

4. A forgácsleválasztás folyamatjellemzői. Forgácsképződés törvényszerűségei

Ezen vizsgálataink jelentőségét az adta, hogy a két eljárás forgácsleválasztása között alapvető különbségek – az egyiknél a szerszámcsúcs forgácsol „pontoszerű” érintkezéssel, a másiknál a szerszámél forgácsol folyamatosan változó, vonalszerű érintkezéssel – hatással vannak a szerszámél hőmérsékleti és a mechanikai terhelésére és a forgácsképződésre.

4.1. Forgácsdeformáció, erő, hőmérséklet

A forgácsdeformációt „Third Wave AdvantEdge 5.5” végeelem szoftver segítségével vizsgáltuk a kutatásba bevont valamennyi eljárásra. A szimuláció során meghatároztuk a hőmérséklet-eloszlást a forgácstőben és a képlékenyalakítás mértékét a forgácsolósebesség függvényében.

A geometriai és kinematikai viszonyokon túl, számításba vettük a munkadarabról leválasztandó rétegvastagságot is. A forgácsképződés rotációs esztergálásnál, geometriai szempontból bonyolultabb. Kiszámítottuk a szerszám bekezdési- és kifutási szögelfordulását, ami az úgynevezett állandósult szakasszal együtt a gépi fődíj egzakt kiszámításának is alapja. Értelmeztük a radiális előtolás és tangenciális előtolást, majd meghatároztuk a forgács szélességet, a forgácsvastagságot, valamint a forgácskeresztmetszetet is. Behatároztuk a forgácsolási adatok megengedhető értékeit, a szakirodalmi ajánlásokat is figyelembe véve.

A forgácsolóerő vizsgálatát kísérleti úton és végeelemes szimulációval végeztük el. Meghatároztuk a forgácsolóerő értékeket a vizsgált eljárásokkal, nagy merevségű MKGS rendszerben, IT5...IT6 pontosságú alkatrészekre. A VEM elemzések mellett forgácsolási kísérleteket is végeztünk a forgácsolási adatok és a forgácsolóerők közötti összefüggések megállapítására. Részletesen elemeztük a passzív (F_p) erőket, mivel keménymegmunkálásnál a három erőkomponens közül a passzív erő (F_p) a legnagyobb. A vizsgálatokat a szerszám élgeometriája és a szerszámkopás függvényében végeztük el és határoztuk meg a változásokat leíró összefüggéseket. Megállapítottuk, hogy hosszesztergálásnál a forgácsolási adatok, az élgeometria és a szerszámkopás függvényében F_p értéke akár ötszöröse lehet az F_c -nek. Elvégzett számításaink és kísérleteink azt mutatták, hogy nagy l/d viszonyú tengelyeknél ($l/d > 20$) ez akkora kihajlást okoz, melynek nagysága hasonló a szokásosan alkalmazott fogásmélységhez. Megállapítottuk, azt is, hogy a fellépő forgácsolóerők nagysága rotációs esztergálásnál kisebb és az erőeloszlás (komponensek aránya) is kedvezőbb. Következésképpen a passzív erő (F_p) hatása a munkadarabok deformációjára nagyságrendileg kisebb. Meghatároztuk ennek okait (forgácsvastagság, élgeometria stb.), valamint értékeinek hullámzását, amely a bekezdőszög, az állandósult szakasz és a kilépőszög határával van összefüggésben.

Elemeztük és vizsgáltuk a hőátviteli folyamatokat köszörülésre és keménysztergálásra (hagyományos, kombinált, rotációs). A megnevezett három eljárás közös jellemzője, hogy a kontakthőmérséklet a munkadarab és szerszám között 800°C fölötti. A magas hőmérséklet mozgó hőforrásként melegíti fel a munkadarabot, elváltozásokat okozva a felszíni rétegben.

A hőmodell (MARC, Fluent) alapja mindhárom eljárásra ugyanaz: gyorsan mozgó hőforrás, amely négydimenziós (x, y, z, t) hőmérséklet-teret hoz létre a munkadarab felszíni rétegben. Megállapítottuk, hogy az elvi azonosság mellett a három eljárás között lényeges különbségek vannak. Keménysztergálásnál a szerszám alakítást végző része állandó kapcsolatban van a munkadarabbal, ezért intenzív a hőképződés. Köszörülésnél nincs állandó kapcsolat a szemcsék és munkadarab között, ezért kevésbé intenzív a hőképződés, alacsonyabb a kontakthőmérséklet. Rotációs esztergálásnál a hosszú él az előtolás(ok) miatt fokozatosan lép fogásba, és a vándorló forgácsoló élszakasz miatt alacsonyabb a kontakthőmérséklet. A hőképződés a fokozatosan munkába lépő él-elemek hűtő hatása miatt kevésbé intenzív, mint keménysztergáláskor, vagy köszörüléskor.

Közlemények: [9, 10, 11, 13, 14, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 40, 43, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 67, 73, 76, 78, 85, 91, 98, 100, 102]

4.2. Szerszámkopás, szerszáméltartam

A szerszám kopásformák elemzését és a szerszám elhasználódását befolyásoló törvényszerűségek vizsgálatát mindkét – a hosszolótól (kombinált eljárásnál alkalmazott) és a körelőtől (rotációs) – esztérgálásnál vizsgáltuk.

Kísérleteket végeztünk a szerszám hátkopás változásának vizsgálatára az előtolás, a fogásmélység és a forgácsolósebesség függvényében. Elemeztük a szerszámkopás fajtáit és formáit, áttekintettük a kopásráta számításának módjait és meghatároztuk értékeit. Vizsgáltuk a kopásráta változását a technológiai adatok függvényében.

Éltartam kritériumnak. a nagyoló esztérgálásnál a hátkopást tekintettük és a forgácsoló adatok függvényében, kísérletekkel határoztuk meg annak nagyságát. Kísérleteink azt mutatták, hogy ún. Taylor-típusú egyenlettel a szerszám elhasználódást pontosan nem lehet leírni, a CBN szerszámok bonyolult kopási mechanizmusa miatt. Ezért a forgácsolószerszám éltartamának leírására az általunk korábban kidolgozott új éltartam-modellt alkalmaztunk, amellyel a szerszám éltartama a teljes sebességtartományban leírható. Kifejlesztettünk egy MatlabSimulink modellt is, amely a hátkopás változása alapján szimulálja az éltartamot. A befejező simító fogásokban alkalmazott szerszámok életlenedési kritériumaként az előírt érdesség nagyságát használtuk. Simításra az érdességnek, mint éltartamkritériumnak figyelembevételével határoztuk meg a szerszámok éltartamát.

Kombinált eljárásnál a kopás és éltartam vizsgálatát a kopásintenzitás, forgácsolási idő, a forgácsolt hossz és az anyagleválasztási sebesség alapján is vizsgáltuk. Rotációs eljárásnál pedig javasoltuk kiegészíteni a vizsgálatokat az él egyenestől való eltérésére, mivel ennek hibái átmásolódva a munkadarabra, befolyásolhatják a munkadarab pontosságát és érdességét is.

Közlemények: [24, 42, 71, 75, 94, 95]

5. Anyagleválasztási teljesítmény meghatározása

A legyártott alkatrésszel szemben támasztott követelményeknek való megfelelés alapján a szóba jöhető alternatívákra elemzést végeztünk az anyagleválasztási teljesítmények meghatározására. Az eljárások hatékonyságára az összehasonlítást műveleti időre ($T_{\text{műveleti}}$), valamint az anyagleválasztási sebességre (MRR - Q_w mm³/s), és a felületképzési sebességre (SR - A_w mm²/s) gyakorlati értékei alapján minősítettük.

Kombinált eljárásnál a vizsgálatokat három keménymegmunkáló eljárás, ötféle változatára végeztük el. A kísérleti adatok össze hasonlításánál a viszonyítási alap a hagyományos módszerű (hosszolótól) köszörülés volt. Olyan technológiai adatokkal dolgoztunk, hogy minden esetben azonos pontosságot és felületi érdességet érjünk el a megmunkált felületeken. Vizsgáltuk a munkadarab geometriai jellemzőinek a megmunkálási időre és az anyagleválasztás hatékonyságára gyakorolt hatását is. Megállapítottuk a hatékonysági rangsort, s megadtuk annak mértékét is.

Rotációs esztérgálás esetén az anyagleválasztási teljesítmény számításai összefüggéseit kellett meghatározunk. Az elemzéshez a forgácsolás három szakaszának pontos megadása, a változó (elsőben növekvő, másodikban állandó, harmadikban csökkenő) forgácskeresztmetszetek számításához szükséges összefüggések megadását is el kellett végeznünk. Meghatározásra került a megmunkálás gépi főideje, a felületképzési sebesség és az anyagleválasztási ráta a forgácsleválasztást befolyásoló valamennyi geometriai és kinematikai paraméter alapján. Ezáltal lehetővé vált az eljárás összehasonlítása más befejező műveletekkel.

Közlemények: [2, 3, 4, 6, 35, 37, 40, 46, 48, 61, 62, 65, 66, 67, 68, 87, 93, 97, 101]

6. A megmunkált felület minőségének vizsgálata

6.1. A megmunkált felület topográfiaja

Elemeztük a keményesztérgálás „klasszikus” periodikus jellegű topográfiáját és a forgácsolásnál fellépő, képlékeny alakításból származó lenyomatokat is. Ilyen pl. a kis forgácsvastagság miatti képlékeny deformáció, amely nehezíti esetleg meg is hiúsítja a forgácsképződést, mivel a szerszámnak egy élrésze (az átmenet az érdességi profilgörbéken is látszik) vagy egésze megcsúszik a felületen és képlékenyen alakítja azt. Ettől eltekintve az érdességi profil (szűrt R profil) teljesen szabályos (periodikus), ezért lehetőség volt érdességi modellek megalkotására, amelyek geometriai alapon készültek és alkalmasak az érdességi jellemzők értékeinek előre történő kiszámítására. Kutatásaink és méréseink során több új érdességi modellt hoztunk létre.

A kombinált eljárásra az érdesség meghatározására a projektben kidolgozott új eredmény, a korábbi kutatásaink során kidolgozott módszer továbbfejlesztése. Lényege, hogy a felületi érdesség elméleti mérőszámainak meghatározására a forgácsolószerszámok általános matematikai modelljén alapult, és a

2D-s érdességi jellemzők meghatározására irányult. Jelen kutatási projektben ennek a módszernek a továbbfejlesztését végeztük el a 3D érdességi paraméterek elméleti értékeinek meghatározására, s néhány, a gyakorlatban általánosan alkalmazott háromdimenziós felületi érdességi paraméter, nevezetesen az Sa átlagos felületi érdesség, illetve az Sz maximális felületmagasság vizsgálatára. Kidolgoztuk a számítási módszer algoritmusát, valamint meghatároztuk a vizsgált háromdimenziós elméleti érdességi mérőszámok számításához szükséges összefüggéseket. Ezek alapján elkészítettük a háromdimenziós elméleti érdességi mérőszámok számítására alkalmas számítógépes szoftvert. A következő lépésben keményszerológási kísérleteket végeztünk különböző geometriájú szerszámokkal, változtatott technológiai paraméterek (forgácsolósebesség, fordulatonkénti előtolás illetve fogásmélység) mellett. A forgácsolt felületeket az Alti®Surf 520 típusú háromdimenziós felületi érdességvizsgáló berendezésen mértük, majd elvégeztük a mért adatok kiértékelését, a vizsgált érdességi paraméterek (Sa ill. Sz) meghatározását az Altmap Premium programban. Ezután meghatároztuk az összefüggéseket az előzetesen számított elméleti valamint a mért felületi érdességi jellemzők között regresszió analízis segítségével. Ezáltal a szabványos felületi érdességi mérőszámok előre tervezhetőek adott szerszám/anyag párosítás esetén a kísérletekkel azonos forgácsolási körülmények esetén.

A rotációs eljárásra a felületi érdességi mérőszámok elméleti értékeinek meghatározására alkalmas modellt a korábban bemutatott matematikai-kinematikai modell felhasználásával készítettük el. Az alapsíknak megfelelő síkkal vett metszet segítségével értelmeztük az érdességi mérőszámok elméleti értékeit. A pontos számítási összefüggések megadásával lehetővé vált a felületek érdességi és a sodrásosságot jellemző mérőszámok elméleti értékeinek meghatározása. Ennek segítségével meghatároztuk kinematikai és geometriai paraméterek valamint a forgácsolási adatok függvényében az érdességi mérőszámok értékeit, majd ugyanazon feltételek mellett végzett kísérlet eredményeivel hasonlítottuk össze. Összehasonlítottuk a mért és elméletileg számított adatokat és megállapítottuk, hogy jó egyezést mutatnak. Ezáltal kijelenthetjük, hogy az általunk használt matematikai-analitikai modell jól alkalmazható a megmunkált felület leírására. Megvizsgáltuk az érdesség változását a döntési szög függvényében is.

Összehasonlító érdességi vizsgálatokat végeztünk esztergált és köszörült felületekre. Tanulmányoztuk a 2D és 3D érdességi paramétereket, valamint az "Alti®Surf 520" 3D érdességmérő berendezésen elvégeztük a köszörült és keményszerológált felületek összehasonlító topográfia vizsgálatát. A különböző keménymegmunkálási eljárásokra elvégzett vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy az érdességi mérőszámok értékei mindhárom eljárással biztosíthatóak, de a működő felületek igényei határozzák meg, melyik eljárás javasolható a felület létrehozására. Ennek megfelelően javaslatot tehetünk arra, hogy milyen működési feltételek mellett, melyik topográfiát ajánljuk. Például megállapítottuk, hogy rotációs esztergálás esetén a hagyományos hosszlejtővel esztergáláshoz képest ugyanolyan érdességű felület lényegesen nagyobb előtolással (és így termelékenységgel) állítható elő, illetve egyező előtolás esetén a generált felület érdessége nagyságrendben kisebb. Továbbá bizonyítottuk, hogy a rotációval előállított felület sodrásossága lényegesen kisebb és értéke minimalizálható.

Közlemények: [1, 8, 12, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 33, 34, 39, 57, 58, 59, 60, 70, 80, 81, 82, 83, 84, 89, 90, 92, 96]

6.2. A felületi (felszíni réteg) változása

Vizsgálatokat végeztünk a forgácsolt felületek felszíni rétegében létrejövő változások meghatározására. Ennek célja a mikrokeménység, a szövetszerkezet (benne a fehér réteg) és a maradó feszültség változásának vizsgálata. Keményszerológálásra 20MnCr5 jelű betétben edzett Különböző forgácsolási technológiával előállított mintadarabokon képződött fehér réteg vastagságát mikroszkópi képelemzős módszerrel, szövetszerkezetét röntgendiffrakciós eljárással vizsgálva azt tapasztaltuk, hogy az martenzitből és maradék ausztenitből áll. A maradékausztenit-tartalom adott v_c forgácsolósebesség esetében a fogásmélységtől és az előtolástól is függ. A maradék ausztenit a betétedezett 20MnCr5 acél esetében 5...25% között van. Megállapítottuk, hogy a fehér réteg nem minden esetben jön létre, nem egyenletes vastagságú és nem is teljesen összefüggő. Beigazolódott, hogy valóban érvényes szabályként fogadható el: a szerszámon mérhető nagyságú hátkopás kialakulásakor akkor képződik fehér réteg, ha $P'_\alpha \geq 150 \text{ W/mm}$. Az erőméréseink eredményeinek felhasználásával kialakítottunk egy olyan empirikus képletet, amellyel a technológiai adatok ismeretében külön erőmérés nélkül is eldönthető, kell-e számítani fehér réteg kialakulására.

A keményszerológált felületi integritását végeelem-módszerrel is vizsgáltuk. Ennek célja, a különböző szerszám-homlokszög értékeknél a megmunkált felületi rétegben kialakuló maradó feszültségi állapot elemzése volt. A homlokszög változtatása az ébredő forgácsoló erőkomponensek értékeit és a kialakuló forgácsolási hőmérsékletet megváltoztatják, s ezen változások függvényében is vizsgáltuk a maradófeszültség változását. A vizsgálat során a Johnson-Cook- féle anyagegyenletet és a Lee-Shaffer forgácsstő-modell N. Fang által módosított változatát alkalmaztuk, ahol figyelembe vettük a forgácsleválasztás során jelenlévő ún. holtzónát. A kutatás célja a holtzóna kiterjedésének hatása a felületi rétegben létrejövő előtolás irányú maradó feszültség nagyságára volt. Megállapítottuk, hogy a holtzóna

kiterjedésének növekedése hatással van az előtolás irányú forgácsoló erőkomponens- és a vele egy irányú maradó feszültség nagyságára is. Az eredményekből kitűnik, ha a holtzóna nagyságának kismértékű növekedése az előtolás irányú maradó feszültség arányosan kismértékű növekedését vonja maga után.

Közlemények: [7, 30, 41, 45, 63, 69, 72, 77, 78, 79, 88, 99]

7. Az eredmények alkalmazhatósága gazdasági hasznosításra

Az kidolgozott módszerek és modellek, valamint az elvégzett összehasonlító vizsgálatok, elsősorban a kombinált eljárások fejlesztésében alkalmazható és segíti alkalmazásának kiterjesztését. Hozzájárul az anyagleválasztás hatékonyságának növeléséhez, ezáltal a gyártási idő és a költségek csökkentéséhez, melyet az eddigi üzemi alkalmazások (ZF Hungaria Kft) is alátámasztottak.