

A MARADÓ FESZÜLTSEGEK VÉGESELEMES VIZSGÁLATA KEMÉNYESZTERGÁLT FELÜLETEKBEN

Szabó Gergely

Adjunktus, Miskolci Egyetem, Gépgyártástechnológiai Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: gergely.szabo@uni-miskolc.hu

Összefoglalás

A keményesztergálással végzett forgácsleválasztás vizsgálata során nem csak az eljárás termelékenységét kell figyelembe venni, hanem a megmunkálás után kialakított felületi réteg állapotát is. A cikkben a keményesztergálás során a megmunkált felületi rétegben kialakuló nyomó-, ill. húzó irányú maradó feszültségeket vizsgáljuk numerikus szimuláció segítségével. A cél annak a vizsgálata, hogy a forgácsoló szerszám homlokszögének változása milyen hatással van a felületi rétegben a maradó feszültség típusára és nagyságára.

Kulcsszavak: keményesztergálás, felületi integritás, maradó feszültség, homlokszög

Abstract

While investigating the chip removal made by hard turning process not only have to consider the productivity but also the surface layer's state shaped after the machining. In this paper we investigate the compressive- and tensile residual stresses formed in the surface layer during hard turning with the application numerical simulation. The aim of investigation was to observe what the effects of the modification of the tool rake angle on the type and largeness of the surface residual stress.

Keywords: hard turning, surface integrity, residual stresses, tool rake angle

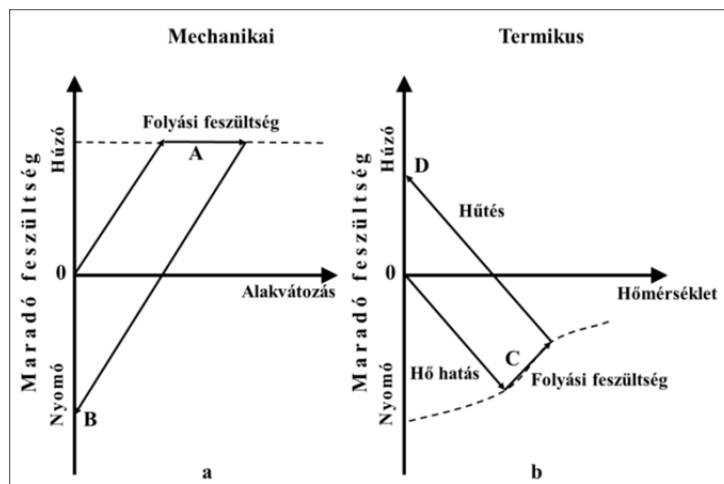
1. Bevezetés

A keményesztergálási művelet vizsgálatánál mindenképp figyelembe kell venni az alkalmazott szerszámok kialakítását. Kemény acél felületek esztergálását a kémiai stabilitás miatt rendszerint polikristályos kőbős bórnitrid (PCBN) szerszámmal végzik. A szuperkemény anyagok megjelenésétől kezdve a szerszámok kialakításukban is nagy fejlődésen mentek keresztül. Geometriai kialakítást illetően az eddigi kutatások tapasztalatait figyelembe véve előnyben kell részesíteni a negatív homlokszöveget [1, 2, 3, 5]. A határozott élű PCBN szerszámok napjainkra rendszerint váltólapkás kivitelűek és szabványosítottak. A felület simaságát fenéssel biztosítják, vagy TiN ill. TiAlN+TiCN bevonattal látják el [1, 4]. A szakirodalom döntő többsége amellet foglalt állást, hogy a forgácsoló él geometriája jelentős hatással van a munkadarab felületi rétegének fizikai állapotára és ezen belül kitüntetett helyet foglal el a munkadarab felületében a maradó feszültségi állapot [4, 6, 7, 8, 9]. A felületi jellemzők (felületi mikro keménység,- topográfia, - szövetszerkezet és –maradó feszültségek) vizsgálatára a gépészetben különálló tudományos diszciplína fejlődött ki,

melynek megnevezése: felületi integritás [6, 35, 36]. Korábbi időkben is irányultak kutatók [7, 10] arra vonatkozólag, hogy a szerszám- homlokszög változása milyen módon befolyásolja a felületi réteg feszültségi állapotát. A vizsgálatok nem minden esetben vezettek arra az eredményre, hogy a homlokszög bármilyen nagyságú csökkentése arányosan növeli a felületi rétegben kialakuló nyomó maradó feszültség értékét. A számos szakirodalmi publikációban [9, 10, 37] található olyan megállapítás, hogy a homlokszög értékének csak bizonyos mértékű csökkentése okoz jelentős felületi nyomó maradó feszültség növekedést, de további növeléssel már nem érhető el jelentős növekedés, ill. kismértékű csökkenés is tapasztalható [8, 9, 11]. A numerikus vizsgálataink során viszonylag nagy szögtartományban vizsgáltuk a kialakuló nyomó feszültségek-, és a szerszám homlokszög érték változásának összefüggését.

2. Felületi maradó feszültségek keménysztergálási művelet után

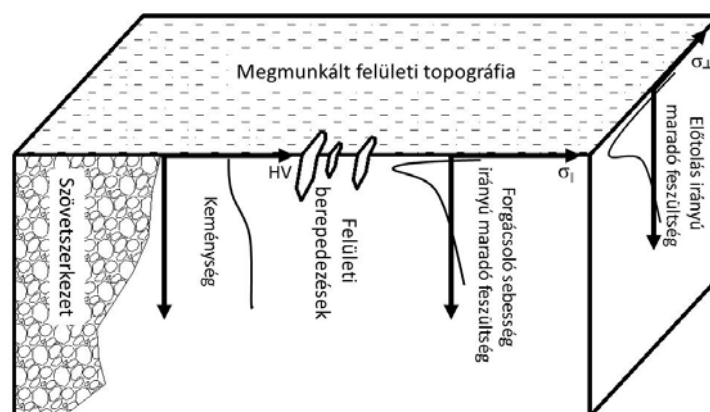
A maradófeszültségek jelentős szerepet játszanak a felületi minőség vizsgálatokor. A felületek szerkezeti jellemzői a felületi minőség legfontosabb alkotóelemei. A maradó feszültség alatt azokat a mechanikai feszültségeket értjük, amelyek valamely munkadarabban, mint szilárd testben léteznek, és úgy alkotnak egyensúlyt, hogy a vizsgált darabra sem külső erő, sem külső nyomaték nem hat [7, 19, 20]. Gunnberg és tsai. [7, 12] szerint forgácsoláskor a maradó feszültségek alapvetően két mechanizmusnak köszönhetően alakulnak ki. Ez a két tényező a forgácsoló szerszám által elvégzett képlékeny alakítás az anyagban (mechanikai), másrészt a forgácsleválasztás során képződő hő (termikus). Ezeknek a maradó feszültség kialakulására való hatásmechanizmusát az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra. A maradófeszültségek kialakulásának mechanizmusai [10]

A szakirodalom [7, 20, 21, 13] alapvetően három csoportba osztja a maradó feszültségeket, ezek: I. rendű- (makroszkópos), II. rendű- (mikroszkópos), III. rendű (szubmikroszkópos) feszültség. A nyomófeszültségek legfontosabb következménye a felület kifáradási törékenyenre vonatkozó befolyása [6, 11], ugyanis fárasztó igénybevételnek kitett gépkatrészek esetén a felületet, és a felület közeli réteget képlékenyen alakítjuk, és ez a deformáció

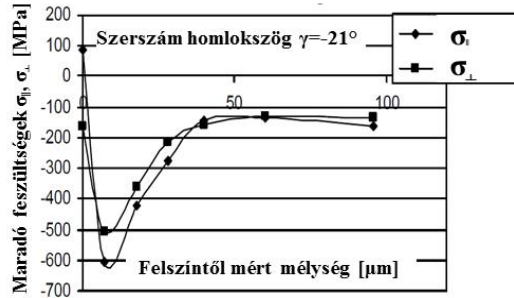
annak keményedését és szilárdságnövekedését is okozza [19, 27, 38, 39]. A megmunkálások során az az optimális eset, ha a maradófeszültségek homogén anyagban ébrednek, II. rendű feszültségek nem keletkeznek és az I. rendű feszültség értéke a felületen mindenütt azonos [7, 19, 20]. A mi általunk vizsgált feszültség a I. kategóriába tartozik. A feszültségeket pedig a megmunkálás előtolás- irányában határoztuk meg (σ_{\perp}). A szakirodalomban számos publikáció foglalkozik hasonló maradó feszültség vizsgálattal. Brinksmeier [15] forgácsolással megmunkált felületi réteg állapotát meghatározó tényezőket és esetleges orientációjukat a 2. ábrán látható módon határozta meg, különös tekintettel a maradó feszültségekre, amelyeket alapvetően előtolás irányú (σ_{\perp}) és forgácsoló sebesség irányú (σ_{\parallel}) komponensekre bontotta.



2. ábra. A felületi réteg állapotának tényezői forgácsoló megmunkálás után [15]

Tönshoff és tsai. [6, 8, 14] megállapították, hogy a szerszám hátkopásának, és a homlokszögének növelése a feszültséget a húzó irányba tereli. Byrne és tsai. [26] a maradófeszültségek tulajdonságainak vizsgálatára végeztek kísérleteket kemény anyagok határozott élű szerszámmal való befejező finom megmunkálása esetén. Véleményük szerint a maradó feszültség értékek összefüggésben vannak a munkadarab és a szerszám közötti súrlódási együttható értékével [1, 26, 28]. Kundrák J. a maradó feszültséget vizsgálta a forgácsolási paraméterek (fogásmélység, előtolás, forgácsoló sebesség) függvényében [22, 23, 24]. A kísérletek során megállapítást nyert, hogy a forgácsolási paraméterek jelentősen befolyásolják a maradó feszültséget, hiszen karakterisztikus görbéjük a paraméter változtatás hatására a felületi réteg mélységének irányában mozdult el. Dahlman és társai [6] a homlokszög és a forgácsolási paraméterek hatását vizsgálták a munkadarab felületi rétegében ébredő maradó feszültségekre keményesztergálás esetén. A vizsgált anyagminőség edzett acél (AISI 52100) volt, 62 HRC keménységgel. Vizsgálták a -6° ... -61° közé eső homlokszögek hatását. A -61° -os homlokszög használata esetén a legnagyobb maradó feszültség érték megközelítőleg a -6° -os esetben mért érték hatszorosa volt [6]. Rech és Moisan [9] a mechanikai feszültségeket vizsgálta edzett acél (27MnCr5), 850 HV (65.7 HRC) esetén. A vizsgálataikat nagy sorozatban gyártott szinkron fogaskerekek külső kapcsolókúpján végezték. Vizsgálataik alapján megállapították, hogy a maradófeszültségek orientációját és nagyságát alapvetően a szerszám anyagminősége, a szerszám bevonata, döntő mértékben a szerszámél kialakítása, valamint a különböző forgácsolási adatok határozzák meg [6]. A felszíni réteg fizikai megváltozását pedig a forgácsoló erő és a forgácsoló

lási hőmérséklet idézik elő [9, 10, 12, 16, 17]. Az előtolás és forgácsoló sebesség irányában, a megmunkált felületi réteg mélységének függvényében a kialakuló maradó feszültség jellegzetes alakjára mutat példát a 3. ábra betétedzett furat keménysztergálása esetén ($v_c=110$ m/min, $a_p=0.1$ mm, $f=0.1$ mm/ford).



3. ábra. Előtolás- (σ_{\perp}) és forgácsoló sebesség irányú (σ_{ϕ}) maradófeszültségek $\gamma=-21^{\circ}$ esetén [6, 9]

Végeselemes vizsgálatainkat ortogonál forgácsolás esetére végeztük és az előtolás irányú maradó feszültségeket (σ_{\perp}) határoztuk meg és hasonlítottuk össze a szerszám homlokszög nagyságának függvényében.

3. A maradó feszültségek végelelemes modellezése

A kísérletet végelelem-módszer (FEM) segítségével végeztük el. A szerszám homlokszöge változása befolyásának vizsgálatát a tangenciális irányú maradó feszültségekre Third Wave AdvantEdge™ 5.5 szoftver 2D-s változata segítségével végeztük el, ami a forgácsolási folyamatok modellezésére lett optimalizálva, ezért több kutató is alkalmazza fémforgácsolás modellezésére. Az általunk használt 16MnCr5 (AISI 5115) anyagminőséghez meg kell találnunk a megfelelő „alakváltozás-feszültség” modellt, amelynek ki kell elégítenie két fontos követelményt: nagy pontosság és viszonylagos matematikai egyszerűség a számítási gyorsaság miatt. Az általunk használt munkadarab anyag viselkedésének leírására a Johnson-Cook egyenletet alkalmaztuk [29, 30, 31]. Ez egy alakváltozás- hőmérsékletfüggő viszkoplasztikus, a feladathoz alkalmas anyagmodell, ahol az alakváltozási sebesség tartománya 10^2 - 10^6 [s^{-1}], a hőmérséklet változásával a hőérzékenység miatt várható képlékeny deformáció miatt következik be [33, 35]. A Johnson-Cook egyenlet következő speciális alakját használjuk:

$$\sigma_{eq} = \left(A + B \cdot \bar{\epsilon}^n \right) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right) \quad (1)$$

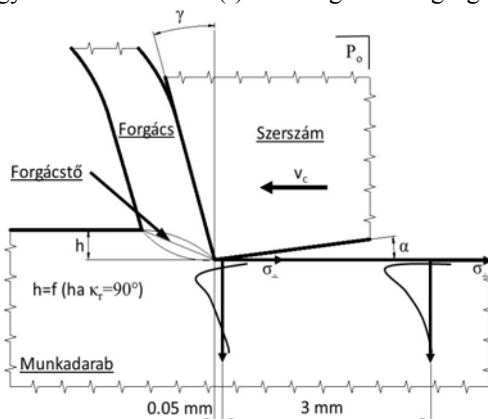
ahol σ_{eq} - az ekvivalens feszültség, $\bar{\epsilon}$ a képlékeny alakváltozás, $\dot{\epsilon}$ - a képlékeny alakváltozás sebessége, $\dot{\epsilon}_0$ - a referencia képlékeny alakváltozási sebessége, T- a munkadarab hőmérséklete, T_{melt} - a munkadarab anyagának olvadási hőmérséklete, T_{room} - a megmunkálás környezetének hőmérséklete, A- a folyási határ, B- a szakítószilárdság, C- a képlékeny alakváltozás érzékenységi hányadosa, n- a felkeményedési tényező, m- pedig a kilágyulási

együttható. A fenti jelölések definícióira és bővebb értelmezésére helyhiány miatt nem térhetünk ki, az idézett szakirodalomban ez megtalálható [29, 30, 31, 35]. A munkadarab anyagminőségének Johnson-Cook féle paramétereit a következők: $\sigma_{eq}=400$ MPa; $A=588$ MPa; $B=680$ MPa; $C=0,057$; $n=0,4$; $m=0,7$ [34]. A kísérleti körülmények az 1. táblázatban vannak összefoglalva.

1. táblázat. A FEM- szimuláció bemenő adatai

Munkadarab jellemzők		Forgácsolási adatok	
Hosszúság	5 mm	Fogásmélység (a_p)	0.2 mm
Szélesség	3 mm	Vizsgált hossz (L)	3 mm
Anyagminőség	16MnCr5 (62HRC)	Előtolás (f)	0.2 mm/ford
Szerszámjellezők		Vágósebesség (v_c)	180 m/min
Homlokszög (γ)	$0^\circ \dots -25^\circ$	Coulomb tény. (μ)	0.35
Élhossz 1 (l_1)	1.2 mm	Hűtés-kenés	Nincs
Hátszög (α)	6°	FEM-szimuláció adatai	
Élhossz 2 (l_2)	2 mm	Max. elemszám	24000
Élradiusz (r_β)	0.01 mm	Max. elem méret	0.1 mm
Anyagminőség	PCBN	Min. elem méret	0.01 mm

Az előtolás irányú maradófeszültségek meghatározása ortogonál forgácsolás esetén a 4. ábrán látható módon történik. Mivel a kísérleti feltételeknek megfelelően a szerszám elhelyezési szög (κ_r) 90° , így az előtolási érték (f) és a forgácsvastagság (h) megegyezik.

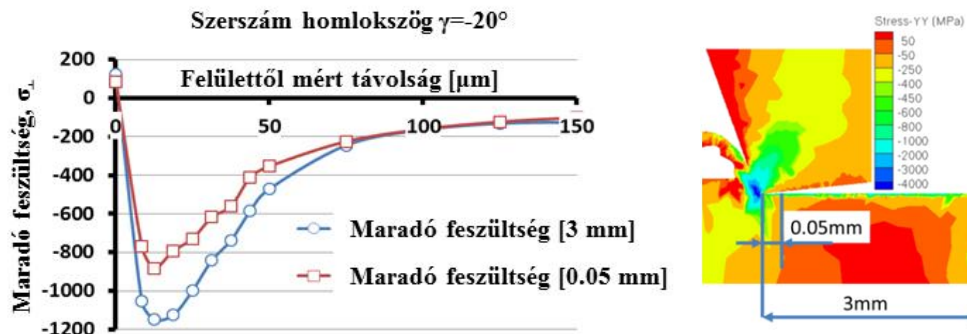


4. ábra. Az előtolás irányú maradófeszültségek (σ_x) értelmezése az ortogonál forgácsolás numerikus szimulációja során

A homlokszög hatása a maradó feszültségekre

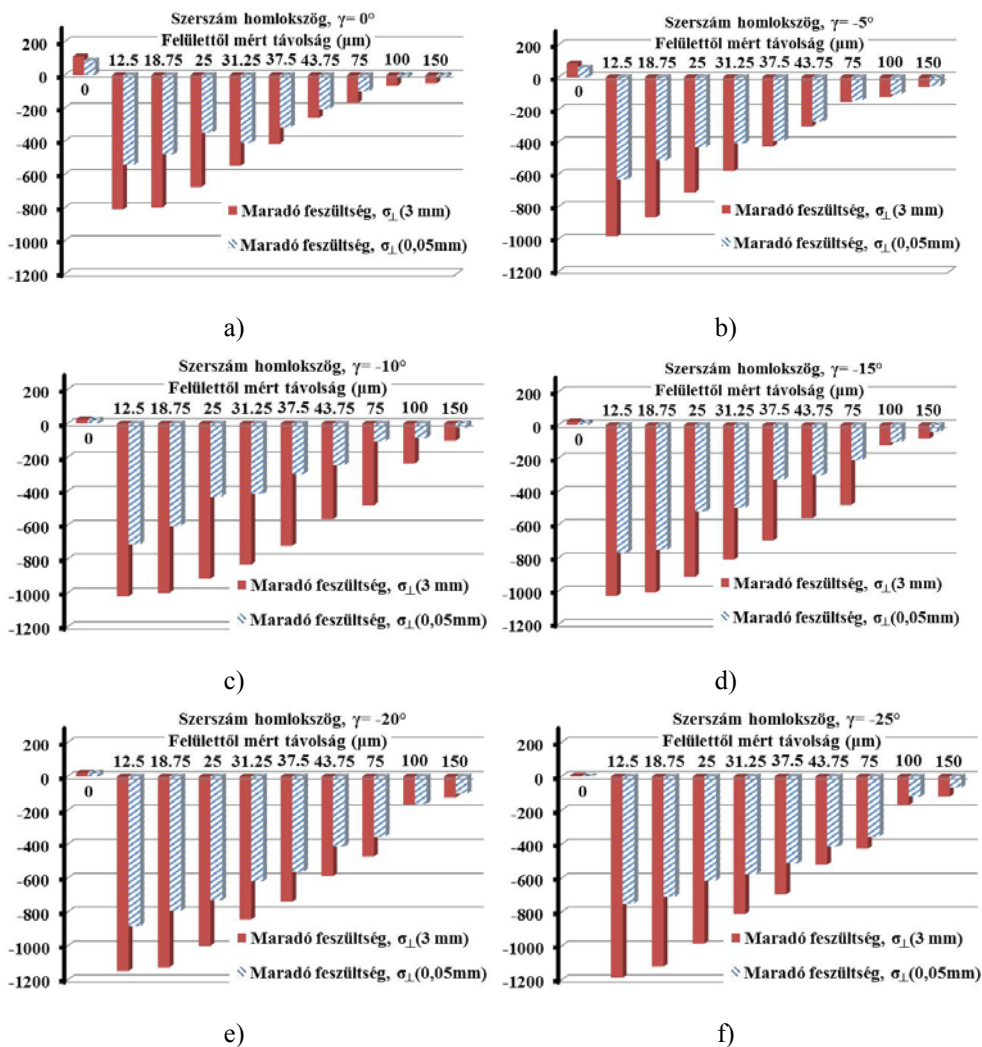
A vizsgálatainkban a homlokszög hatását elemeztük $0^\circ \dots -25^\circ$ között, 5 fokos lépésben. A numerikus eredmények elemzése során a megmunkált munkadarabon a szerszáméltól 3 mm-re végeztük a maradó feszültség értékeinek meghatározását. Annak

igazolására, hogy a szakirodalomban leírt [6, 7, 10, 14] termikus képződési mechanizmus miatt a kialakuló maradó feszültség értéke nagyban függhet a vizsgált felületi réteg hőfokától, a méréseket a szerszámél közvetlen környezetében is vizsgáltuk. Az 5. ábrán bejelölt 0.05 mm-es távolság közvetlenül a szerszámél mögött látható, viszonylag magas hőmérséklettel. Az 5. ábrán bemutatjuk, hogy a magasabb és az alacsonyabb hőmérsékletű felület esetén miképpen különböznek a maradó feszültség értékei. Megfigyelhető, hogy magasabb hőmérsékleten –közvetlenül a szerszámél környezetében- kisebb feszültség alakul ki, mint a már kihűlt rétegben. Az eredmény megfelel az irodalomban foglalt megállapításnak [7, 10], hogy magas hőmérsékleten még nem állandósul teljes egészében a felületi feszültségi állapot, ezért a forgácsleválasztás hőhatásövezetének közvetlen közelében mérve nem juthatunk helyes feszültségértékekhez.



5. ábra. Az előtolás irányú maradó feszültségek (σ) változása a vizsgált rétegmélység és a szerszáméltól mért távolság függvényében

A maradó feszültségek kialakulását, ahogyan azt Johnson-Cook egyenlet és az 1. ábra is kifejezi, két effektussal lehet magyarázni: mechanikai és termikus effektussal. Ezeket szétválasztani nem lehet, együttesen lépnek fel, és egymásra is hatnak. Az általunk meghatározott eredmények megerősítik a szakirodalomban található megállapításokat [6, 7, 10, 14, 7]. A FEM- analízis eredményei a keménysztergálással megmunkált munkadarab felületben található előtolás irányú maradó feszültségeket mutatják a 6. ábrán. A diagramokon feltűntettük mindkét mérési távolságon a maradó feszültség értékeit a felülettől mért távolság függvényében. Az előtolás irányában mért mélységek nagysága az ortogonál síkban, a diagramok vízszintes tengelyén található mikrométerben megadva. A vizsgálati mélységek nem ekvidisztánsak, súlyozottan kerültek meghatározásra. A felület közvetlen közelében sűrűbb (háromszoros) pontfelvételt alkalmaztunk, mert a tapasztalatok [7, 10], azt mutatják, hogy ebben a tartományban (0...50 μm) vannak a maradófeszültségek a legnagyobb hatással a megmunkált felszíni réteg fizikai állapotára. Megfigyelhető minden ábrán, hogy közvetlenül a felszínen kis mértékben pozitív, azaz húzófeszültség alakul ki, ez egyes szerzők álláspontját erősíti meg [7, 8, 11, 20]. Közvetlenül a felszíni réteg alatt (10 és 15 μm között) található a meghatározott nyomó maradó feszültségek maximum értékei. Valamennyi vizsgált szögérték mellett számottevő nyomó maradó feszültség alakult ki [32].



6. ábra. Az előtolás irányú maradófeszültségek (σ_{\perp}) FEM- módszerrel kapott értékei a szerszáméltól számított 0.05 mm és 3 mm távolságra a felülettől mért mélység függvényében

4. Összefoglalás

A cikkben a változó homlokszögű szerszámmal végzett keményesztergálás ortogonál forgácsolási modelljére numerikus (FEM) szimuláció segítségével határoztuk meg az előtolás irányú maradófeszültségek értékeit különböző rétegmélységek esetén. A forgácsoló megmunkálásoknál általában arra törekszünk, hogy a forgácsolási technológiát feltétlenül úgy válasszuk meg, hogy lehetőleg ugyanolyan nyomó maradó feszültség jöjjön létre. A kísérletek azt mutatták, ha a γ homlokszög érték negatív lesz, akkor biztosítható ez az elvárás. A

vizsgálat során arra a megállapításra jutottunk, hogy az alkalmazott homlokszög- tartományban ($\gamma=0^\circ\div-25^\circ$) teljesül a szakirodalomban is megerősített megállapítás, hogy a homlokszög legnagyobb mértékű csökkentése ($\gamma_0=-25^\circ$) okozza a legnagyobb mértékű nyomó maradófeszültség csökkenést a felületi rétegben. A szakirodalomban több szerző [6, 9, 25, 26, 40] is megállapította, hogy a keményszergaláskor alkalmazott határozott élű PCBN szerszámok homlokszögét $\gamma=-6^\circ\div-26^\circ$ között érdemes alkalmazni. Tehát a kapott eredmények alapján a legkisebb vizsgált homlokszög értékkel érdemes a forgácsoló megmunkálást tervezni és elvégezni.

5. Köszönetnyilvánítás

A cikk a TÁMOP-4.2.2.B-10/1-2010-0008 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. A cikkben ismertetett kutatómunkát az Országos Tudományos Kutatási Alapítvány (OTKA K 78482) támogatta. A támogatásért a szerző ezúton is köszönetet mond.

6. Irodalom

- [1] Weinert K., Biermann D.: *Spanende Fertigung (Prozesse, Innovationen, Werkstoffe)*. Vulkan Verlag, Essen, 2008. ISBN 978-3-8027-2943-0
- [2] Szakács Gy., Dévényi M.: *Keményfémek és szuperkemény anyagok alkalmazása*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978. ISBN 963-10-2122 X
- [3] Koch K. F.: *Technologie des Hochpräzisions- Hartdrehens*. Dissertation RWTH Aachen, Band 5/96, Shaker Verlag, Aachen, 1996. ISBN 3-8265-1392-4
- [4] Jochmann S.: *Untersuchungen zur Prozess- und Werkzeugauslegung beim Hochpräzisionshartdrehen*. Dissertation RWTH Aachen, Band 19/2001, Shaker Verlag, Aachen, 2001. ISBN 3-8265-9244-1
- [5] Davim J. P. et al.: *Machining of Hard Materials*. Springer Verlag, London, 2011. ISBN: 978-1-84996-449-4
- [6] Davim J. P. et al.: *Surface Integrity in Machining*. Springer Verlag, London, 2010. ISBN: 978-1-84882-873-2
- [7] Brinksmeier F., Cammet J. T., König W., Lekovar P., Peters J., Tönshoff H. K.: *Residual stresses- measurement and causes in machining processes*. CIRP Annals Vol. 31/2, 1982, pp. 491-510.
- [8] Matsumoto Y., Hashimoto F., Lahoti G.: *Surface integrity generated by precision hard turning*. Annals of the CIRP, Vol. 48/1, 1999, pp. 59-62.
- [9] Dahlmann P., Gunnberg F., Jacobson M.: *The influence of rake angle, cutting feed and cutting depth on residual stresses in hard turning*, Journal of Materials Processing Technology Vol. 147, 2004, pp. 181-184.
- [10] Gunnberg F., Escursell M., Jacobson M.: *The Influence of cutting parameters on residual stresses and surface topography during hard turning of 18MnCr5 case carburised steel*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 174, 2006, pp. 82-90.
- [11] Shaw M. C.: *Metal Cutting Principles*. Oxford University Press, New York, 2005. ISBN 978-0-19-514206-8

- [12] Stephenson D. A., Agapiou J. S.: *Metal Cutting Theory and Practice*. CRC Press, Boca Raton US, 2005. ISBN 978-0-8247-5888-2
- [13] Denkena B., Tönshoff H. K.: *Spanen*. Springer Verlag, Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-19771-0
- [14] Tönshoff H. K., Arendt C., Ben Amor R.: *Cutting of Hardened Steel*. CIRP Annals Vol 49., No. 2, 2000
- [15] Brinksmeier E.: *Prozeß- und Werkstückqualität in der Feinbearbeitung*, Habilitation Universität Hannover. VDI Verlag, Düsseldorf, 1991. ISBN 3-18-143402-7
- [16] König W., Komanduri R., Tönshoff H. K., Ackerschott G.: *Machining of Hard Materials*. CIRP Annals Vol. 33/2, 1984. pp. 417-427.
- [17] Thiele J. D., Peascoe R. A., Watkins T. R.: *Effect of Cutting-Edge Geometry and Workpiece Hardness on Surface Residual Stresses in Finish Hard Turning of AISI 52100 Steel*. Transactions of the ASME Vol. 122, 2000. pp. 642-649.
- [18] Sanjeev S., Ahuja I. S., Sharma V. S.: *Modelling the Effects of Cutting Parameters on Residual Stresses in Hard Turning of AISI H11 Tool Steel*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012.
- [19] Jawahir I. S., Brinksmeier E., M'Sauobi R., Aspinwall D. K., Outeiro J. C., Meyer D., Umbrello D., Jayal A. D.: *Surface Integrity in Material Removal Processes: Recent Advances*. CIRP Annals Vol 60, 2011. pp. 603-626.
- [20] Sólyom J.: *Maradó feszültség mérése röntgen diffrakciós módszerrel gépalkatrészekben (Tanulmány)*. Miskolc, 2007.
- [21] Gribovszki L.: *Maradó feszültségek hőálló ötvözetekben*. Nehézipari Műszaki Egyetem Közleményei, Vol. 14, Miskolc, 1967, pp. 123-136.
- [22] Kundrak J.: *The Scientific Principles of Increasing the Effectiveness of Inner Surfaces' Cutting with CBN Tools*, Academic Doctoral Dissertation. Kharkov, 1996 p. 368 (In Russian)
- [23] Mamalis A. G., Kundrak J., Gyani K.: *On the Dry Machining of Steel Surfaces Using Superhard Tools*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2002, Vol. 19., pp. 157-162
- [24] Kundrak J., Mamalis A. G., Gyani K., Bana V.: *Surface Layer Microhardness Changes with High-Speed Turning of Hardened Steels*.
- [25] Goldstein M.: *Optimierung der Fertigungsfolge „Kaltfließpressen-Spanen“ durch Hartdrehen als Feinbearbeitungsverfahren für einsatzgehärtete Preßteile*. Dissertation RWTH Aachen, 1991
- [26] Schmidt J.: *Mechanische und thermische Wirkungen beim Drehen gehärteter Stähle*. Dissertation IFW, Hannover, 1999.
- [27] Bana v.: *Manufacturing of High Precision Bores*. Dissertation TU Delft, 2006. ISBN 978-90-9020708-7
- [28] Winands N.: *Hartdrehen aus der Umformwärme gehärteter Wälzlagering*. Dissertation RWTH Aachen, Band 20/96, 1996. ISBN 3-8265-1567-6
- [29] Al-Zkeri I.: *Finite Element Modeling of Hard Turning*. VDM Verlag Dr. Müller, 2009. ISBN 978-36-391-1034-0
- [30] Cook R., D.: *Finite Element Modeling for Stress Analysis*. John Wiley & Sons INC. New York, 1995. ISBN 0-471-10774-3
- [31] Third Wave AdvantEdge™ User's Manual, Version 5.5

- [32] Szabó G., Kundrák J.: *Investigation on coherences between residual stresses and tool geometry by hard turning*. Hungarian Journal of Industrial Chemistry. Vol. 39/2, 2011, pp. 289-294.
- [33] Davim J. P., Maramhao C.: *A Study of Plastic Strain and Plastic Strain Rate in Machining of Steel AISI 1045 Using FEM Analysis*. Materials and Design, Vol. 30, 2009, pp. 160-165.
- [34] ČSN 41 4220/ISO 683/11-70
- [35] Byrne G., Dornfeld D., Denkena B.: *Advancing cutting technology*. CIRP Annals, 2003, Manufacturing Technology, Vol. 52/2, pp. 483-507
- [36] Field M., Kahles J. F.: *Review of Surface Integrity of Machined Components*. CIRP Annals, Vol. 20/1, 1971. pp. 107-108.
- [37] Thiele J. D., Melkote S. N., Peascoe R. A., Watkins T. R.: *Effect of Cutting-Edge Geometry and Workpiece Hardness on Surface Residual Stresses in Finish Hard Turning of AISI 52100 Steel*. Transactions of the ASME, Vol. 122, 2000. pp. 642-649.
- [38] El-Wardany T. I., Kishawy H. A., Elbestawi M. A.: *Surface Integrity of Die Material in High Speed Hard Machining, Part 1: Micrographical Analysis*. Transactions of the ASME, Vol. 122, 2000. pp. 620-631.
- [39] El-Wardany T. I., Kishawy H. A., Elbestawi M. A.: *Surface Integrity of Die Material in High Speed Hard Machining, Part 2: Microhardness Variations and Residual Stresses*. Transactions of the ASME, Vol. 122, 2000. pp. 632-641.
- [40] Klocke F., Brinksmeier E., Weinert K.: *Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes*. CIRP Annals Vol. 54/2, 2005. pp. 22-45.