

AZ ÖNHAJTÁSÚ FORGÓ SZERSZÁM (SPRT) BEMUTATÁSA, A JÖVŐBENI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI IRÁNYOK MEGHATÁROZÁSA

PRESENTATION OF THE SELF-PROPELLED ROTARY TOOL (SPRT) AND IDENTIFICATION OF FUTURE RESEARCH AND DEVELOPMENT DIRECTIONS

Csorba Béla István 0009-0009-9551-7478*

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Gyártástechnológia Kutatócsoport, GAMF Műszaki és
Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

<https://doi.org/10.47833/2026.1.ENG.011>

Kulcsszavak:

SPRT
működési elv
felépítés
előnyök és hátrányok
kutatási és fejlesztési irányok

Keywords:

SPRT
operating principle
structure
advantages and disadvantages
research and development
directions

Cikk történet:

Beérkezett 2025. október 10.
Átdolgozva 2026. február 17.
Elfogadva 2026. március 5.

Összefoglalás

A cikk az önhajtású forgó szerszámmal (Self-propelled rotaring tool - SPRT) történő forgácsolási megmunkálások során szerzett tapasztalatokat mutatja be. Kevés magyar nyelvű cikk és kutatási eredmény született, amely valószínűleg a szerszámok kutatása során fellépő problémák még nem teljes megoldása miatt is lehet. A cikkben bemutatom a szerszám felépítését, működését, rövid történeti áttekintését, az eddigi tapasztalatokat, amelyek által megismerhető a jelenlegi helyzet a szerszámmal kapcsolatban. Emellett rámutatok fontos problémákra is, amelyek problémák feltárása, megértése, és ezekre történő megoldási lehetőségek megadása remek alapot szolgáltat a szerszám esetében a jövőbeni kutatási, fejlesztési irányokra.

Abstract

The article presents practical experiences gained during machining operations using a self-propelled rotary tool (SPRT). Only a limited number of publications and research results are available in Hungarian, which may partly be attributed to unresolved challenges encountered during the investigation and development of such tools. The paper introduces the tool's structure and operating principle, provides a brief historical overview, and summarizes the experience accumulated to date, thereby outlining the current state of development and application of the SPRT. In addition, it highlights key technical and technological issues. The identification and in-depth analysis of these problems, together with the formulation of potential solutions, provide a solid foundation for defining future research and development directions.

1. Történeti idővonal

Nemzetközi szinten számos cikk, kutatás született az önhajtású forgó szerszám (SPRT, Self-propelled rotaring tool) használatával, alkalmazásával kapcsolatban. A 19. és 20. század fordulóján számos és kutató foglalkozott már a témával és sikerült is kifejleszteniük egy fémek

* Csorba Béla István
E-mail cím: csorba.bela@nje.hu

megmunkálására alkalmas, a hagyományostól eltérő forgó szerszámot. Ezen kutatók a világ számos országaiból származtak, pl. Egyesült Királyság, Franciaország, Németország, Oroszország, Egyesült Államok.

A 19. század végén James Napier Nagy Britanniában már ezen szerszám erőteljes alkalmazását javasolta. Egy csésze alakú marót egy, az eszterga főorsójához csatlakozó kinematikai láncon keresztül hajtott meg. 1921-ben Billion javasolta egy önforgó csőmaró alkalmazását. L. M. Ignatyev 1929-ben a Szovjetunióban feltalálta az első forgó marót. Az új forgó maró segítségével a forgácsolási sebesség drasztikusan, 70–90%-ban nőtt, az energiafelhasználás viszont 35–40%-al csökkent, emellett a forgácsoláskor keletkező anyagleválasztás mértéke 5–6-szorosra növekedett. A kutatások során sikerült bebizonyítani, hogy a termelékenység növekedését a viszonylag kis fogásmélységgel alkalmazott forgó marók használata eredményezte [1].

Felismerve a szerszám hasznos tulajdonságait, a 20. század második felében rengeteg kutatást, kísérleteket végeztek a Szovjetunió területén, melyek nagyban hozzájárultak a forgó szerszámok gyakorlatban való elterjedésének. Olyan iparágakban vezették be, mint pl. a villamosipar, papíripar, autóipar.

A századfordulón és a 21. század fordulóján a nyugati országokban is sok kutatás folyt, melynek hozadékeként a forgó szerszámok alkalmazása gyökeret vert a repülőgépiparban és az űriparban a nehezebben megmunkálható anyagok forgácsolására. Shuting Lei és társai Ti–6Al–4V titánötvözet nagysebességű megmunkálásakor használtak egy hajtott forgó szerszámot esztergálásnál [2]. Kossakowska J. és társai az SPRT szerszám esztergáláskor való alkalmazása során vizsgálták az esztergált felület minőségét. Új módszert fejlesztettek, amellyel a betét forgási sebességét és a vágási paramétereket tudták összekapcsolni. Vizsgálták a szerszám merevségét is [3].

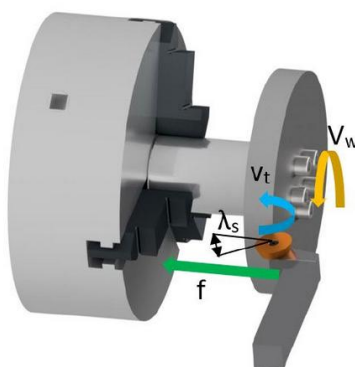
Balaji J. H. és társai a nehezen forgácsolható titánötvözetek megmunkálásakor vizsgálták a homlokszög hatását a forgácsolóerőre és a hőmérsékletre. A mérések és a forgács alakjának megfigyelése mellett FEA analízissel igazolták megállapításaikat [4].

Ezen szerszám sorozatgyártása céljából az Egyesült Államokban direkt e célból jöttek létre vállalatok [5].

2. Az SPRT szerszám működése

Az SPRT olyan kör alakú lapkából álló forgácsoló szerszám, amely forgácsolás közben a saját tengelye körül forog, miközben érintkezik a munkadarabbal. A forgás abból adódik, hogy a forgácsoláskor leszaladó forgács a lapka felületén sűrűlő erőt fejt ki, ezen sűrűlő erő nyomatókat ad a lapka tengelyére és a lapka forgásának elindulását eredményezi. Ezen forgás hatására a lapkának mindig friss éle érintkezik a munkadarabbal, amely a lapka élének egyenletes kopását eredményezi, szemben a fix helyzetű lapkákkal (1. ábra).

Lényeges előny a fix helyzetű lapkával szemben az is, hogy míg a fix helyzetű lapkánál nagy hőmérséklet generálódik a forgácsolási környezetben, a forgó lapka esetében ez lényegesen kisebb, mivel mindig új forgácsolóél rész kerül a forgácsolási zónába, ezáltal nem halmozódik fel hőcsúcs egy ponton.

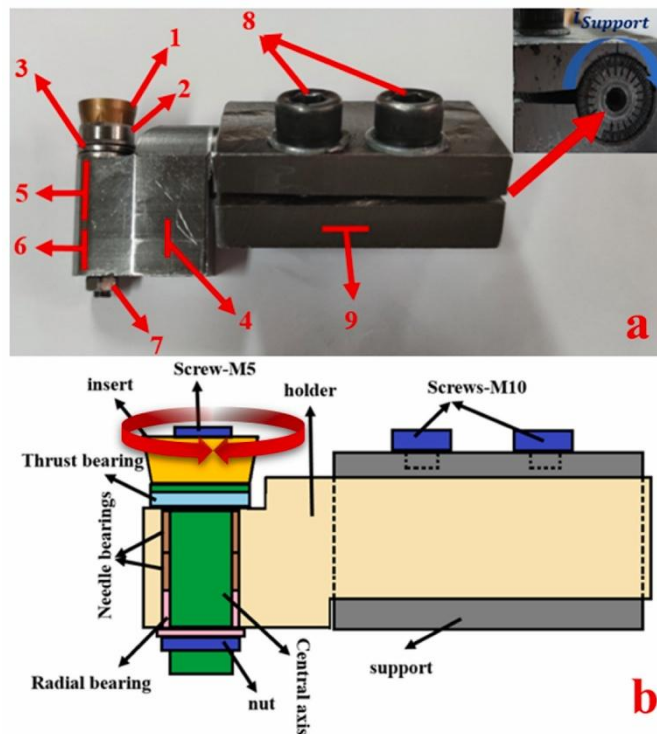


1. ábra Az SPRT szerszám működése [6]

Az, hogy ez a forgás létrejöjjön a lapkát egy bizonyos szögben be kell dönteni a munkadarab tengelyéhez képest – melyet az 1. ábrán látható λ_s jelöl -, amely segíti a forgács könnyebb lefutását, eltávolodását és a lapka forgásának elindulását. A forgácslefutásból létrejövő önforgásnak köszönhetően a szerszám így külön hajtásrendszert egyáltalán nem igényel, vagyis kevésbé energiaigényes, továbbá a felépítése jóval egyszerűbb.

3. Az SPRT szerszám felépítése

Alapvetően a szerszám két fő részből áll: egy szerszámtartó-befogóból és egy görgőkkel csapágyazott forgó lapkából (2. ábra). Az ábra felső részén az egyes elemek számmal, az alsó része vannak megnevezve.



2. ábra Az SPRT szerszám felépítése [7]

A lapka (1 - insert) egy központi tengelyhez (2 - Central axis) kapcsolódik, amelyre egy balmenetes csavarral (Screw-M5) van felerősítve. Erre azért van szükség, mert a forgácsolási erők iránya miatt a lapka az óramutató járásával ellentétesen forog, ezáltal egy jobbos csavar gyorsan és könnyen kitekeredne, ami által a lapka leugorhat a tengelyről. A bal menetes csavarral ezen probléma kiküszöbölhető. A csavar mérete a lapka méretétől függ. A lapka és a központi tengely egy talpcsapágyon (3 - Thrust bearing) helyezkedik el, ami lehetővé teszi a szabad forgást a tengelynek és a ráerősített lapkának. A központi tengelyt két tűcsapágy (5 - Needle bearings) tartja pozícióban a szerszámtartó (4 - holder) középső részében. A központi tengelyt egy anyával (7 - nut) rögzítik a radiális csapágy (6 - Radial bearing) belső gyűrűjéhez.

A szerszámtartó (4 - holder) a tengelye körül elforgatható a tartóelemben (9 - support), hogy a megfelelő szöget be lehessen állítani, majd két rögzítőcsavarral (8 - Screw M10) a pozíciója rögzíthető. A talpcsapágnál a felső és az alsó gyűrű belső méretei között szükséges egy kis eltérést alkalmazni (0,2 mm) azért, mert az egyik gyűrű (felső gyűrű) rögzítve van a központi tengelyen, míg a másik gyűrű szabadon marad. A két gyűrű nincs összeillesztve, mivel ortogonális terhelés esetén a talpcsapágyak teherbírása lényegesen csökken, ezáltal a szerkezet tönkremehet és a tengely lapkával való futása pontatlanná válik.

4. Kutatási eredmények

Az SPRT alkalmazását számos aspektuson keresztül vizsgálták. Rengeteg szakmai cikk és kísérlet szól arról, hogy az SPRT miként alkalmazható nehezen megmunkálható anyagoknál.

Kishawy és társai vizsgálták az SPRT alkalmazhatóságának határait titán- és nikkelötvözetek megmunkálásakor. [8] Kísérleteikkel igazolták a forgácsoláskor keletkező hő jelentős csökkenését, a szerszám éltartamának jelentős növekedését a hagyományoshoz képest. Emellett a kutatásuk során arra jöttek rá, hogy a nehezen forgácsolható szuperötvözetek megmunkálása folyamán nagy forgácsolási sebesség mellett simább felületet eredményez az SPRT alkalmazása.

El-Mounayri és társai egy 55 HRC keménységű acél megmunkálásakor összehasonlították egy SPRT és egy hagyományos szerszám teljesítőképességét. Az összehasonlítás eredménye, hogy az SPRT-vel történt megmunkálás során hosszabb szerszámtartam és hagyományoshoz képest lényegesen nagyobb forgácsolási hatékonyság jön létre [9].

Kossakowska-Jemielniak [10] kutatása az SPRT-vel végzett forgácsolásról szólt, melynél vizsgálták a megmunkált felület hullámosságát és a forgács milyenségét. Méréseik során arra jutottak, hogy a SPRT lapka tényleges forgási sebessége elmarad az elméleti értéktől, mert az eszköz merevsége és annak mozgás befolyásolja a mérési eredményeket. A tanulmány arra is rávilágított, hogy a lapka megmunkálás során rezeg (excentricitás lép fel), amely jelentősen befolyásolhatja a megmunkált felület pontosságát, illetve lényegesen befolyásolja a rendszer stabilitását is.

Li és Kishawy [11], valamint Hao és társai [12] olyan matematikai modellek kidolgozásán dolgoztak, amelyek segítségével SPRT-vel való forgácsolás során megjósolható a forgácsoló erők nagysága, a hőeloszlás mértéke és a lapka kopásának nagysága a forgácsoló sebesség, előtolás, a lapka dőlési szögének függvényében. E modellek nagyban hozzájárulnak ahhoz, hogy a megfelelő forgácsolási paraméterek segítenek az SPRT szerszám viselkedésének megértésében.

Számos cikk jelent meg az SPRT-vel való kutatással kapcsolatban. Vannak, amelyek csak a szerszám viselkedésével, a lapka kopásával foglalkoznak.

Motgi, és N., Chinchani Inconel 718 forgácsolásakor a szerszámkopást, különösen az oldalsó kopást vizsgálták, hogy javítsák a méretpontosságot és a termékminőséget [13].

Umer U. és társai egy önhajtású forgó keménységű szerszám teljesítményét vizsgálták 54–56 HRC keménységű AISI 4340 acél megmunkálásakor. Empirikus, geometriai alapú modellt dolgoztak ki az oldalkopás előrejelzésére, amelynek paramétereit genetikus programozással határozták meg [14].

E. O. Ezugwu és társai IMI 318 titánötvözet simító esztergálásakor egy önhajtású forgószerszám teljesítményét vizsgálták. Kimutatták, hogy a kör alakú, bevonat nélküli WC–Co betétek a forgácsolási energia teljes elmenti eloszlása révén jelentősen jobb kopásállóságot biztosítanak, mint a hagyományos kerek, rombusz alakú és PVD TiN bevonatú keménységű betétek. A szerszámot nagyobb forgácsolósebességen alkalmazva csökkent a hőből eredő kopási mechanizmus, miközben a ciklikus hő- és mechanikai igénybevételből származó kopás volt a domináns meghibásodási forma [15].

Anthony Xavier M. és társai Inconel 718 esztergálásakor alkalmazott különböző szerszámanyagok (PVD TiAlN bevonatú keménységű, Al_2O_3 –TiC kerámia és cBN) éltartamát és oldalkopási viselkedését vizsgálták eltérő forgácsolási sebesség, előtolás és fogásmélység mellett, állandó szerszámgeometria alkalmazásával. Az oldalkopást optikai mikroszkóppal és SEM-mel elemezték, majd ANOVA segítségével meghatározták a megmunkálási paraméterek százalékos hatását a kopás alakulására. Az elemzés eredménye az, hogy a szerszámkopást leginkább befolyásoló paraméter a szerszám (betét) anyaga, és a forgácsolási sebesség [16].

A forgácsolási paraméterek vizsgálata szintén egy sarkalatos pontja a szerszámmal kapcsolatos kutatásoknak [17] [18]. Emellett nem elfelejtendő a megmunkált felületek milyensége [19] [20], illetve a megmunkálendő anyagok sokasága, amelyek különböző iparágakban különbözőképpen vannak jelen.

5. Az SPRT előnyei és hátrányai

5.1. AZ SPRT előnyei:

5.1.1. Szerszáméltartam növekedés

A forgácsolóél folyamatos mozgása végett nem alakul ki tartós kopás, a kopás egyenletesnek mondható. Az SPRT éltartama több tízszeres is lehet egy hagyományos lapkához képest egy pl. repülőiparban alkalmazott anyag megmunkálásakor [21].

5.1.2. Forgácsolási hőmérséklet csökkenés

A lapka forgásából adódóan a forgácsoláskor keletkező hő arányosan oszlik el, amely a szerszám és a munkadarab hőterhelésének csökkenését eredményezi. A lapka működés közben egy forgó csapágy viselkedését mutatja, amely által a beáramló hűtőközeg megfelelően tudja hűteni a forgácsolási zónát. Forgácsoláskor az érintkezési terület átlagos hőmérséklet értéke több mint 50 C°-al is csökkenhet (kb. 430 C°-ról 375 C°-ra) [22].

5.1.3. Gyorsabb anyageltávolítás

A teljes forgácsolóél használata során nagyobb anyagmennyiséget lehet eltávolítani ugyanazon idő alatt. Az érintkező forgácsolóél hossza ugyanakkora, viszont folyamatosan vándorol, ahogy forog a szerszám, így van kihasználva a teljes forgácsolóél és mindig hűtött élrész kerül a forgácsolási zónába. Ennek folyományaként SPRT-vel történő forgácsolási eljárás során nagyobb forgácsolási sebesség érhető el nehezen megmunkálható anyagoknál, amely magával vonja a nagyobb anyagleválasztási ráta nagyságát [1].

5.1.4. Felületi minőség

A körlapkával készült felület simább finomabb felületet eredményez. Az SPRT-vel készült nehezen forgácsolható anyagok esetén a felület egyenletesebb, simább. A forgács osztottá válik a lefutáskor, a forgácsolóél nem maródik be a munkadarab kész felületébe [1].

5.1.5. Nehezen forgácsolható anyagok megmunkálhatósága

Az SPRT hatékonysága különösen a magas kopásállóságú és hőállóságú lapkákkal látványos. Ez CBN, kerámia, vagy keményfém. Sikeresen megmunkálható a titán-, vagy a nikkelbázisú szuperötvözetek, az edzett acélok. Számos szakirodalom között szerepel még a SiC-dal erősített alumínium kompozit (SiC w/Al) forgácsolása [23]. Szinte minden anyag megmunkálásakor nagyobb szerszám éltartam, jobb felületi minőség érhető el [24].

5.2. Az SPRT hátrányai

5.2.1. A rezgések és erőhatások emelkedése

A körlapka mérete erősen kihat a megmunkáló berendezés merevségére és ezáltal a megmunkálás kimenetelére. A lapka méretének növekedése esetén a vágóerő is radikálisan növekszik, ami erős rezonanciát és instabilitást okoz a berendezésben. Ezért speciális, stabil szerszámtartó szükséges, illetve a megmunkáló központ főorsójának megerősítése is fontos [25]. A rezgés mérésére különböző lehetőségek vannak, amelyek a megmunkálás stabilitására, a felületek minőségére és a szerszámkopás előrejelzésére szolgálnak. Ezen eszközök közé tartoznak a gyorsulásmérők - a szerszámtartóra, vagy a munkadarabra rögzítve mérik a rezgés nagyságát, intenzitását -, vagy az akusztikus emissziós szenzorok, amelyek a forgácsolás során létrejövő negyfrekvenciás hanghullámokat mérik. A kapott jeleket frekvenciaanalízis segítségével (Fourier-sorfejtés/FFT) elemzik, majd kiszűrjük külön a kényszerrezgéseket és az öngerjesztett rezgéseket [26].

5.2.2. Pontatlanság és excentricitás

A pontosság korlátozása a lapka futásában és a szerszámtest merevségében keresendő. Számos kutató mérései szerint a tényleges forgási sebesség elmaradt a várttól, vagy számolttól. Ebből kifolyólag pontatlanság lép fel. Ez a pontatlanság a felületi érdességben, a hullámosságban

mutatható ki különösen akkor, ha nagy pontosságú megmunkálás szükséges nagyon vékony falú elemek forgácsolásakor [27].

5.2.3. Szerszámkopás

Bár az SPRT-vel történő megmunkálás során a kopás kiegyenlítődik, a lapkák akkor is kopnak, csak abrazív módon. Ez akkor jelentkezhet, amikor különösen elhúzóódó megmunkálás van, és ebből kifolyólag némi oldalhajlítás lép fel.

5.2.4. Forgácsképződési és forgácseltávolítási problémák

Mivel a forgácsot folyamatosan sodorja a felület körül a forgó lapka, előfordulhat a forgács "felcsavarodása" (adherencia) és görbülése. Kossakowska és Jemielniak megfigyelték, hogy az egyik hátrány a forgács rendezetlen, koncentrikus csavarodása, ami nehezebbé teszi a forgácselvezetést [28].

5.2.5. Magas költségek és karbantarthatóság

A szerszám belsejében lévő csapágyazás és tömítések alkalmazása miatt ezen eszközök jóval bonyolultabbak a hagyományos szerszámtartókhoz képest. Több nagy gyártó termékei ebből kifolyólag nehezen szervizelhetők, amely az árak jelentős növekedését vonja maga után. Már csak azért is, mert a cserélendő elemek csak az adott gyártó által forgalmazott elemekkel helyettesíthetők. Ezeket is figyelembe véve a fenntartási és beruházási költségek a költségvetést jelentős mértékben megemelhetik. A fenntarthatóságra már születtek eredmények. Trung-Thanh Nguyen és társai egy optimalizálási módszert mutatnak be keményacél forgácsolásakor. A módszer továbbfejlesztett Kriging modellek és szomszédos kultivációs genetikai algoritmus (NCGA) alkalmazásával javítja az energiahatékonyságot, csökkenti a költségeket, mérsékli az érdességet és növeli a működési biztonságot a dőlésszög, fogásmélység, előtolás és forgácsolási sebesség optimális beállításával [29].

5.2.6. Korlátozott maximális forgási sebesség

Az SPRT esetén a sebesség a forgácsolási paraméterektől és a lapka dőlési szögétől jelentős mértékben függ. A dőlésszög túl nagy értékre választása esetén a fordulatszám csökkenhet, emellett a csapágyak nagy hőterhelése is erőteljesen korlátozhatja [27].

6. Az SPRT ipari alkalmazása

- Keményacélok, nagyszilárdságú szerkezeti anyagok, vasúti, repülőipari, vagy gépjárműalkatrészek (pl. sebességváltó bemenőtengely) megmunkálása, akár hőkezelés utáni megmunkálása.
- Titán- és nehezen forgácsolható szuperötvözetek megmunkálása. Ezek közé tartozik a repülő és űrparban használatos fémek (Inconel, Waspaloy, Ti-6Al-4V stb.).
- Kompozitanyagok, speciális ötvözetek megmunkálása. Kevés kutatás van a SiC alapú kerámia- és kompozit töltetű anyagok megmunkálásáról.
- Precíziós megmunkálás. Finomabb kontúrok kialakítása során is jól alkalmazható, mint pl. belső furatok megmunkálása köszörülés helyett. Ebben az esetben a szerszám állíthatósága előnyös.

7. Konklúzió, összegzés

Az önhajtott forgó szerszámok (SPRT) alkalmazása számos előnnyel jár, főleg nehezen forgácsolható anyagok esetében.

Ide tartozik:

- a magasabb szerszáméltartam, nagyobb leválasztott fogácstérfogat, jobb forgácsolt felület. Viszont az SPRT alkalmazásakor fontos, hogy a megmunkálás gondosan és jól legyen megtervezve.
- Emellett a megfelelő gépesítésre is rendkívül nagy szükség van ahhoz, hogy a megmunkálás pontos legyen és a gép stabilitás is megfelelő legyen. A kutatások a mai napig folynak, főbb irányok az optimális élgeometriák, anyagok, forgácsolási paraméterek optimalizálása.
- A magasabb költségek lefaragása céljából újfajta szerkezeti kialakítások megalkotása a cél, megfelelő csapágyazás, vagy akár moduláris rendszer felépítése, az univerzialis elősegítése. A technológia folyamatos fejlődése lehetőséget biztosít az SPRT szerszám konstrukciós kialakításának fejlesztésére, pl. additív technológia segítségével olyan szerszám geometria hozható létre, amely eddig nem volt elkészíthető.

Ezen előnyök ismeretében rangsorolhatóvá válnak az egyes jövőbeni feladatok. Prioritást élvez a szerszám kialakítása, azon belül a csapágyazás és tömítés megoldása. A kialakított szerszámot érdemes lehet különböző dinamikai szimulációknak alávetni, amely segítségével a működés közbeni rezgéseket tudjuk megállapítani. A rezgések mérésére akár a mérési protokollok szabványosítása is lehetséges. A költséghatékonysági elemzések szintén fontosak egy ilyen szerszám használatakor.

Mindezen megállapítások alapján jól látható, hogy több mint 100 éve ismert eljárás jelen korunkban érheti el azon formáját, mellyel az ipar számára is hasznos, hasznosabb szerszámmá válhat. Ez alapján új kutatások és tudományos eredmények várhatóak a közeljövőben.

Irodalomjegyzék

- [1] E. O. Ezugwu, "Improvements in the machining of aero-engine alloys using self-propelled rotary tooling technique," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 185, no. 1–3, pp. 60–71, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.112.
- [2] S. Lei and W. Liu, "High-speed machining of titanium alloys using the driven rotary tool," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, no. 6, pp. 653–661, May 2002, doi: 10.1016/S0890-6955(02)00012-3.
- [3] J. Kossakowska and K. Jemielniak, "Application of Self-Propelled Rotary Tools for Turning of Difficult-to-machine Materials," *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 425–430, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.procir.2012.04.076.
- [4] J. H. Balaji, V. Krishnaraj, and S. Yogeswaraj, "Investigation on High Speed Turning of Titanium Alloys," *Procedia Engineering*, vol. 64, pp. 926–935, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.09.169.
- [5] "Rotary Technologies Corporation." Accessed: Jun. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.rotarytech.com/>
- [6] R. Joch *et al.*, "Impact of Chip Breaker Geometry on the Performance of Actively Rotary Monolithic Turning Tools," *Materials*, vol. 18, p. 1154, Mar. 2025, doi: 10.3390/ma18051154.
- [7] M. A. Yousefvand, H. Akbari, and B. Davoodi, "Investigating the effect of tool surface micro-texturing on self-propelled rotary tools used for machining aluminum 7075," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 36, pp. 4625–4631, May 2025, doi: 10.1016/j.jmrt.2025.04.171.
- [8] U. Umer, H. Kishawy, M. H. Abidi, S. H. Mian, and K. Moiduddin, "Evaluation of Self-Propelled Rotary Tool in the Machining of Hardened Steel Using Finite Element Models," *Materials*, vol. 13, no. 22, Art. no. 22, Jan. 2020, doi: 10.3390/ma13225092.
- [9] H. El-Mounayri, A. L. Razak, and M. Kessler, "Investigating Turning of Hard-to-Cut Material Using Self-Propelled Rotary Tool," presented at the ASME 2011 International

- Manufacturing Science and Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, Sep. 2011, pp. 331–338. doi: 10.1115/MSEC2011-50026.
- [10] J. Kossakowska and K. Jemielniak, “Application of Self-Propelled Rotary Tools for Turning of Difficult-to-machine Materials,” *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 425–430, 2012, doi: 10.1016/j.procir.2012.04.076.
- [11] L. Li and H. A. Kishawy, “A model for cutting forces generated during machining with self-propelled rotary tools,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 12, pp. 1388–1394, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.10.003.
- [12] W. Hao, X. Zhu, X. Li, and G. Turyagyenda, “Prediction of cutting force for self-propelled rotary tool using artificial neural networks,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 180, no. 1, pp. 23–29, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.04.123.
- [13] S. Chinchankar and N. Motgi, “Tool wear evaluation of self-propelled rotary tool and conventional round tool during turning Inconel 718,” *Fracture and Structural Integrity*, vol. 18, no. 70, pp. 242–256, Sep. 2024, doi: 10.3221/IGF-ESIS.70.14.
- [14] “Tool Wear Prediction When Machining with Self-Propelled Rotary Tools.” Accessed: Aug. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/12/4059>
- [15] E. O. Ezugwu, K. A. Olajire, and Z. M. Wang, “Wear evaluation of a self-propelled rotary tool when machining titanium alloy IMI 318,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 216, no. 6, pp. 891–897, Jun. 2002, doi: 10.1243/095440502320193012.
- [16] M. A. Xavier, M. Manohar, P. Jeyapandiarajan, and P. M. Madhukar, “Tool Wear Assessment During Machining of Inconel 718,” *Procedia Engineering*, vol. 174, pp. 1000–1008, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.252.
- [17] P. Nieslony *et al.*, “Study on physical and technological effects of precise turning with self-propelled rotary tool,” *Precision Engineering*, vol. 66, pp. 62–75, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.precisioneng.2020.06.003.
- [18] “Sustainability-Based Optimization of the Rotary Turning of the Hardened Steel.” Accessed: Aug. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/7/939>
- [19] A.-L. Van, T.-T. Nguyen, and X.-B. Dang, “Optimization of Rough Self-Propelled Rotary Turning Parameters in terms of Total Energy Consumption and Surface Roughness,” *Tehnički vjesnik*, vol. 30, no. 6, pp. 1728–1736, Oct. 2023, doi: 10.17559/TV-20230202000308.
- [20] M. A. Yousefvand, H. Akbari, and B. Davoodi, “Investigating the effect of tool surface micro-texturing on self-propelled rotary tools used for machining aluminum 7075,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 36, pp. 4625–4631, May 2025, doi: 10.1016/j.jmrt.2025.04.171.
- [21] Z. M. Wang, Ezugwu, E. O., and A. and Gupta, “Evaluation of a Self-Propelled Rotary Tool in the Machining of Aerospace Materials,” *Tribology Transactions*, vol. 41, no. 2, pp. 289–295, Jan. 1998, doi: 10.1080/10402009808983750.
- [22] W. Ahmed, H. Hegab, H. A. Kishawy, and A. Mohany, “Estimation of temperature in machining with self-propelled rotary tools using finite element method,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 61, pp. 100–110, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.10.080.
- [23] P. Chen and T. Hoshi, “High-Performance Machining of SiC Whisker-Reinforced Aluminium Composite by Self-Propelled Rotary Tools,” *CIRP Annals*, vol. 41, no. 1, pp. 59–62, Jan. 1992, doi: 10.1016/S0007-8506(07)61152-4.

- [24] “Modeling and multi-response optimization of machining performance while turning hardened steel with self-propelled rotary tool | *Advances in Manufacturing*.” Accessed: Jun. 23, 2025. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40436-014-0092-z>
- [25] W. S. Hao, X. S. Zhu, B. J. Tian, and M. R. Chi, “Autoregressive Spectrum Analysis of Vibration and Condition Monitoring of Self-Propelled Rotary Tool,” *Key Engineering Materials*, vol. 329, pp. 743–748, 2007, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.329.743.
- [26] W. S. Hao, X. S. Zhu, B. J. Tian, and M. R. Chi, “Autoregressive Spectrum Analysis of Vibration and Condition Monitoring of Self-Propelled Rotary Tool,” *KEM*, vol. 329, pp. 743–748, Jan. 2007, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.329.743.
- [27] E. O. Ezugwu, “Improvements in the machining of aero-engine alloys using self-propelled rotary tooling technique,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 185, no. 1–3, pp. 60–71, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.112.
- [28] J. Kossakowska and K. Jemielniak, “Application of Self-Propelled Rotary Tools for Turning of Difficult-to-machine Materials,” *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 425–430, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.procir.2012.04.076.
- [29] T.-T. Nguyen, Q.-D. Duong, and M. Mia, “Sustainability-Based Optimization of the Rotary Turning of the Hardened Steel,” *Metals*, vol. 10, no. 7, p. 939, Jul. 2020, doi: 10.3390/met10070939.

[1]