

NEHEZEN FORGÁCSOLHATÓ ANYAGOK ÁTTEKINTÉSE, JÖVŐBENI LEHETSÉGES KUTATÁSI CÉLOK FELVÁZOLÁSA

OVERVIEW OF DIFFICULT-TO-MACHINE MATERIALS, OUTLINE OF POSSIBLE FUTURE RESEARCH GOALS

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.008>

Kulcsszavak:

Forgácsolás
forgácsolhatóság
ötvözetek

Keywords:

cutting
machinability
alloys

Cikktörténet:

Beérkezett 2025. november 27.
Átdolgozva 2025. december 27.
Elfogadva 2026. február 3.

Összefoglalás

A szerző bemutatja a nehezen forgácsolható anyagokat, azok tulajdonságait. Összefoglalja az egyes ötvözeteknél a pozitívumokat és a negatívumokat, kiemelve a forgácsolhatóságot. Ezután levonva a következtetéseket javaslatot ad új fejlesztési irányokra, amelyek ezen ötvözetek forgácsolhatóságának javítását szolgálja.

Abstract

The author presents materials that are difficult to machine and their properties. He summarizes the advantages and disadvantages of each alloy, highlighting machinability. Then, drawing conclusions, he offers recommendations for new development directions aimed at improving the machinability of these alloys.

1. Bevezetés

A forgácsolás egy főleg szerszámgépen végzett, bonyolult anyagleválasztási folyamatnak tekinthető. Az anyag forgácsolással történő nagy sebességű leválasztása során magas hőmérséklet jön létre a forgácsolási zónában, mely hőmérséklet értéke nagyban függ attól, hogy a megmunkált anyag mechanikai, szilárdsági tulajdonságai milyenek. Ezek a tulajdonságok nagymértékben vannak kihatással a forgácsolás hatékonyságára is.

A forgácsolhatóság egy összetett jellemző, amely arra szolgál, hogy a megítélhető legyen a forgácsolás folyamatának jósága. A forgácsolhatóság, mint jellemző sok mindentől függ.

A megmunkált anyag felől megközelítve fontos befolyásoló tényezők:

- a kémiai összetétel,
- a szövetszerkezet,
- a mechanikai jellemzők.

A fő jellemzők közé a szerszám felől nézve:

- a kopás
- az éltartam sorolható.

A kiegészítő jellemzők közé tehető:

- a forgácsolóerő és teljesítmény,
- a forgácsolási hőmérséklet,
- az anyagáram (leválasztott anyagmennyiség),
- a felületi érdesség,

* Kapcsolattartó szerző. Email: csorba.bela@nje.hu

- illetve a forgács típusa, mérete [1].

Mint minden megmunkálásnál, a forgácsolásnál is fontos szempont a gazdaságosság, ezért a forgácsolás és a forgácsolhatóság javítása, fejlesztése kiemelt jelentőségű bármely, forgácsolással foglalkozó cég, vállalat számára.

Rendkívüli kihívásnak tekinthető a nagy keménységű, nagy szilárdságú, rossz hővezető képességű anyagok megmunkálása, amelyek a szerszám éltartam szempontjából kiemelt fontosságúak. Ezért egy nehezen forgácsolható anyag esetében a forgácsolási paraméterek megválasztása nagyon specifikusnak kell lennie.

Megoldás lehet egy olyan forgácsolószerszám alkalmazása, amely ezen ötvözetek forgácsolásakor lényegesen job választás a hagyományos lapkás szerszámokhoz képest. Erre példa az önjáró forgó lapkás szerszám, rövidítve SPRT (self-propelled rotary tool) [2]. Ezen szerszám alkalmazása számos előnnyel jár, mint például a magasabb szerszámelettartam, nagyobb leválasztott fogácstérfogat, jobb forgácsolt felület, amelyek a nehezen forgácsolható anyagok forgácsolásakor fontos szempontok.

2. Nehezen megmunkálható anyagok

A modern ipar – különösen a repülőgépipar, energiaipar, vegyipar és orvostechnika – egyre nagyobb arányban alkalmaz olyan nagy ellenálló képességű fémötvözeteket, amelyek extrém mechanikai, kémiai és termikus terhelések mellett is megbízhatóan működnek. Ezeknek az anyagoknak az előnyös üzemeltetési tulajdonságai azonban gyártástechnológiai szempontból komoly kihívást jelentenek, ugyanis forgácsolhatóságuk jelentősen rosszabb a hagyományos acélokhoz vagy alumíniumötvözetekhez képest (1. táblázat) [3].

1. táblázat Nehezen forgácsolható anyagok összehasonlítása

Anyagcsoport	Hővezetés	Szilárdság/ Keménység	Kopásállóság	Forgácsolhatóság (%)*
Ötvözött acél (pl. 4140)	Közepes	Magas (edzve 50-60 HRC)	Magas	~55-65%
Korrózióálló acél	Alacsony	Közepes/Magas	Hajlamos a felkenődésre	~30-50%
Titánötvözetek	Igen alacsony	Nagyon magas	Erős abrazív kopás	~15-25%
Nikkelötvözetek (Inconel)	Igen alacsony	Extrém melegsilárdság	Nagyon magas	~10-15%
Edzett acélok	Közepes	Extrém magas (60+ HRC)	Extrém (abrazív)	< 20%

*Az AISI B1112 (DIN: 1.0711; ISO: 9S20K) acélhoz (100%) viszonyított forgácsolhatósági index.

Ezen anyagok megmunkálása során a szerszámok kopása jelentősen megnő, a forgácsolás során keletkező hőmérséklet rendkívül magas lesz a forgácsolási zónában, nagy forgácsolóerő jön létre, nagy a szerszámkopás, továbbá megmunkált felület minősége nagyon gyenge.

Összefoglalva a nehezen forgácsolható anyagok kategória olyan fémekre, vagy nem fémekre és azok ötvözeire vonatkozik, amelyeknél a forgácsolás során:

- a szerszámok éltartama nagyon gyorsan lecsökken,
- a forgácsolási zónában a létrejövő hő nem távozik el hatékonyan a forgácsban,
- kedvezőtlen forgács képződik,
- nagy forgácsolóerők alakulnak ki,
- a szerszámgépen jelentős rezgés vehető észre.

A nehezen megmunkálható anyagok közé tartoznak a szuperötvözetek, a korrózióálló acélok (ferrites, ausztenites, mertenzites, ausztenit-ferrites szövetszerkezetűek), a szerszámacélok

(ötvözetlen, melegalakító, hidegalakító szerszámacélok, gyorsacélok) a magas hőállóságú fémek és ötvözeik (pl. titánból, nikkelből, készült ötvözetek). Ha nem csak a fémeket nézzük, akkor problémásan forgácsolható anyagok a kompozitok, kerámiák, polimerek, és a magnéziumötvözetek is [4].

2.1. Nikkelalapú szuperötvözetek (pl. Inconel 718, Hastelloy, Waspaloy)

A nikkelalapú szuperötvözeteket extrém hőmérsékleti, mechanikai és korróziós igénybevételre fejlesztettek ki. Különlegességük abban rejlik, hogy mikroszerkezeti stabilitásukat és szilárdságukat magas hőmérsékleten, 700–1000 °C-on is megtartják [5] [6].

A nikkel-bázisú szuperötvözetek olyan tulajdonságokkal bírnak emellett, amelyek felelősek a rossz megmunkálhatóságért. A nikkel-bázisú szuperötvözeteknek ausztenites mátrixuk van, ez megmunkálás során felkeményedik. A forgácsban a nyírás lokalizációja koptató hatást gyakorol az éleken, ami megnehezíti a forgácskezelést. Ezek az ötvözetek hajlamosak a szerszámanyaggal való hegedésre is a megmunkálás során keletkező magas hőmérsékleten, így az élrátét kialakulásának a valószínűsége nagy lesz. A kemény koptató karbidok jelenléte a megmunkálhatóságot mikroszerkezetükben szintén csökkenti. Az ötvözetek magas hőmérséklete és szilárdsága a szerszámanyagtól és az alkalmazott forgácsolási körülményektől függően a forgácsolási zónában felgyorsult hátkopást, kráterkopást és kitöredezést fog eredményül adni. A nikkelbázisú szuperötvözetek a kiválós keményedésre erősen hajlamosak [7] [8].

Főbb típusai:

- Kúszásálló, γ' -keményített ötvözetek (Inconel 738, Rene 80, Rene 142, CMSX-4 (egy kristályos))
- Oldatkeményített ötvözetek (Inconel 625, Hastelloy X)
- Precipitációval (kiválással történő keményítés) keményíthető ötvözetek (Inconel 718 (ipar egyik leggyakrabban használt ötvöze), Waspaloy, Udimet 720)
- Öntött, kovácsolt és egy kristályos típusok: az öntött jobban alakítható, de porózusabb szerkezetet eredményez (pl. Rene 108). A kovácsolt homogénebb szerkezet ad, az egy kristályos (SX), vagy irányítottan szilárdított nagy hőmérsékletű környezetben működő alkatrészek esetében alkalmazzák.

Ezek az acélok magas hőmérsékleti szilárdsággal rendelkeznek. A nikkel szilárd oldatként és γ' (gamma-prím) fázisként kiválóan ellenáll kúszásnak, vetemedésnek, mikrostruktúra-leválásnak, szemcsenövekedésnek. A nagy szilárdság fő oka a $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ alapú γ' fázis, amely erős rendezettséget mutat. Ez a stabilitása 700–900 °C-ig rendkívül jó [8] [9].

Kiváló oxidáció- és korrózióállósággal bírnak. A magas krómtartalom (20–25%) és további ötvözőelemek (Al, Ti, Mo, Nb) stabil védőoxid réteget hoznak létre [10].

Stabil mikroszerkezetük van. A többlépcsős hőkezelések révén biztosítható a nagy szilárdság, a hosszan tartó kúszásállóság, és a remek fáradásállóság [11] [12].

A megmunkálásuk viszont nehézségekbe ütközik. A nikkelalapú szuperötvözetek az egyik legnehezebben forgácsolható anyagok, mert alacsony hővezetésük révén a hő a szerszámon halmozódik fel. Magas szakítószilárdság értékük miatt forgácsoláskor nagy vágóerők jelennek meg. Forgácsoláskor a szerszám felületén tapadási és diffúziós kopást okoznak, illetve hosszú forgács képződik, amely a forgácsolt felület minőségét erősen ronthatja [13].

Összességében a nikkel bázisú szuperötvözetek páratlan kombinációt kínálnak magas hőmérsékleti szilárdság, korrózióállóság és mikrostruktúra-stabilitás tekintetében. Kulcsszerepet játszanak a modern energetikai és repülőgépipari rendszerek hatásfokának növelésében [14].

Viszont a megmunkálásuk rendkívül költséges és nehézkes, a hagyományos forgácsolási eljárásokkal gyakran csak alacsony hatékonyság érhető el. Speciális szerszámanyagokra és hűtési módszerekre (Kriogén + MQL kombinált rendszerek, intelligens, irányított hűtőcsatornák, energiahatékony, környezetbarát hűtőközegek) van szükség ahhoz, hogy a szerszámkopás, hőfelhalmozódás és kémiai reakciók minél alacsonyabb értéken legyenek [15] [16] [17] [18].

2.2. Titán bázisú ötvözetek

A titánötvözetek a legnagyobb fajlagos szilárdság, korrózióállóság és biokompatibilitás kombinációjával rendelkező szerkezeti anyagok közé tartoznak. A repülőgépiparban, az autópiparban, a vegyiparban, és az orvosbiológiai iparban is nagy mennyiségben használják kiváló mechanika- és fizikai tulajdonságaiknak köszönhetően. Egyedülálló mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, mint például jó szilárdság és tömeg arány (fajlagos szilárdság) és a korrózióállóság magas hőmérsékleten [19].

Napjainkban a titán-aluminid ötvözetet (repülőgép-, autópipari fejlesztés eredménye) előszeretettel alkalmazzák a magas mechanikai követelményeket igénylő területeken, mivel magas a hőmérsékleti körülmények között egyedülálló teljesítményre képesek [20].

A titánötvözetek azonban kifejezetten nehezen forgácsolhatók. Alacsony hővezető képessége miatt, amely az acél hővezetésének ~20%-a, emiatt a hő szinte teljesen a szerszámon koncentrálódik, amely hősokkot és diffúziós kopást eredményez. A forró titán könnyen heged a szerszám éléhez, emiatt mikrohegesedés alakul ki, a szerszámon kráterkopás jön létre, és beégett felület képződik [21] [22].

Forgácsolás során erős munkakeményedési hajlama lesz, ezért fokozza a forgácsolóerőt, a második fogásnál már a munkadarab felkeményedett rétegébe lép fogásba a szerszám.

Az acélhoz képest alacsony rugalmassági modulussal ($E \approx 110$ GPa) rendelkezik, amely azt a problémát hozza magával, hogy a munkadarab „rugalmassága” miatt könnyen beremeg, rezgések alakulnak ki, amely rezgések felületi hibákhoz vezetnek.

Megmunkálásakor a forgács nehezen törhető, ragadós, kitépi a felületet és rontja, amely instabil forgácsolási folyamatot is eredményezhet [23].

Összességében a titánötvözetek megmunkálhatóságát a hőelvezetési és kémiai tulajdonságok korlátozzák leginkább. Ezen hagyományos hűtési technológiák mellett a modern hűtési és szerszámtervezési módszerek jelentik a probléma megoldását [24] [25] [26].

2.3. Korrózióálló acélok

A korrózióálló acélok felhasználási területei kedvező tulajdonságainak köszönhetően rendkívül szerteágazó. Nagy gyakorisággal alkalmazzák az ipar számos területén, például vegyészet, élelmiszeripar, építőipar, egészségügy, gyógyszeripar, háztartási cikkek. A környezeti hatásoknak való rendkívüli ellenállásuknak köszönhetően e széles elterjedési területüket [27] [28].

Legfontosabb ötvözője a króm (10,5 %), amely segítségével a felületen Cr_2O_3 passzív réteg képződik. Ez egy önjavító, vékony réteg, amely kiváló korrózióállóságot biztosít az acélnek. A króm mellett ötvözője a Ni (szívósság és ausztenites szerkezet biztosítása), a Mo (piitingállóság, savállóság), a N (szilárdság növelés), illetve a Mn, Cu, Nb, Ti, amelyek speciális szerepeket játszanak az acél tulajdonságainak javításában.

Szövetszerkezetük alapján lehetnek ferrites, martenzites, ausztenites, duplex (ferrit-ausztenit), illetve kiválósosan keményedő. A piaci eloszlást tekintve a legnagyobb elterjedése az ausztenitesnek van, után a kiválósosan keményedő következik, a többi elterjedése nem jelentős.

A ferrites szövetszerkezetű acélok nem edzhetők hőkezeléssel, közepes korrózióállóság, jó alakíthatóság jellemzi, gyengén hegeszthető bizonyos típusok esetében. Forgácsolhatóságot tekintve könnyebben forgácsolhatók, mint az ausztenitesek [29] [30].

A martenzites korrózióálló acélok nagy szilárdságúak, jó keménységűek, mérsékelt korrózióállóságúak. Gyakran alkalmazzák edzett állapotban 45–55 HRC tartományban. Ami hátrány, hogy éppen edzett állapotban kifejezetten nehéz a megmunkálhatósága, amihez CBN ajánlott [31] [32].

Az ausztenites acélok kiváló korrózióállósággal és szívóssággal (akár -196 °C-ig) rendelkeznek. Nem edzhető hőkezeléssel, és erősen munkakeményedik (a felület akár $+150$ – 250 HV-el keményebb lehet) [33] [34].

A duplex és szuperduplex acélok vegyes szerkezettel rendelkeznek, 50% ferrit + 50% ausztenit. Nagy a folyáshatára, kétszer nagyobb az auszteniteshez képest. Nagyon jó a pittingállósága, gyakori az olaj- és gázipari alkalmazásokban. Magas szilárdsága és abrúzió (abrúzió) miatt nehezen forgácsolható, ami nagy szerszámkopást eredményez [35].

Összességében a korrózióálló acélok megmunkálhatósága, a munkakeményedésen és a szívósságon múlik leginkább. Az ausztenites típusok – bár puhábbak – sokszor nehezebben forgácsolhatók, mint a martenziteselek vagy a ferriteselek. A duplex acélok esetében a magas szilárdság extrém szerszámkopást okoz. A megmunkálási folyamatok során a paraméterek pontos beállítása rendkívül fontos tényező. Egy optimális beállítással forgácsolt korrózióálló acél megmunkálásakor a szerszámélettartam akár tizedére eshet vissza [36] [37] [38] [39].

2.4. Nehezen megmunkálható szerszám ötvözetek

Az egyik ilyen ötvözet a 42CrMo4 nagyszilárdságú acél [40]. Széles körben alkalmazzák nagyméretű hidegalakító szerszámoknál, illetve nagy mechanikai terhelést igénylő fogaskerekek és tengelyek, orsók, összekötő rudak és forgattyús tengelyek alapanyagaként. Emellett nagy fáradási és torziós szilárdságot, kopás- és ütésállóságot, jó szívósságot és edzhetőséget igénylő alkatrészek esetében is kedvelt alapanyag. Jó szilárdság-szívósság aránnyal rendelkezik, nagyon jól hőkezelhető anyagról van szó. Nagy keresztmetszetekben is kiválóan edzhető. Egy nagyon megbízható, kiszámítható tulajdonságokkal rendelkező anyag. Forgácsolhatósága viszonylag könnyű, de csak lágyított állapotban [41].

Alacsony hővezetőképessége miatt mégis a nehezen megmunkálható anyagok közé tartozik, amelyeknél problémát jelent a nagy forgácsolási ellenállás, a magas forgácsolási hőmérséklet, a forgácstörés nehézségei és a szerszámokon magas koptató hatást eredményez [42] [43].

Összességében ez az acéltípus ideális szerkezeti acélnak mondható, ha magas szilárdságra, jó edzhetőségre és kedvező ár-érték arányra van szükség. Forgácsolhatósága lágyított állapotban jó, de edzett formában jelentősen romlik. A nitridálható képesség miatt kiváló kopásálló felületek hozhatók létre nagy szívósságú maganyaggal. Jól kombinálja a mechanikai tulajdonságokat, ezért széles körben használható dinamikus terhelte alkatrészeknél [44].

3. Konklúzió

Napjainkban a nehezen forgácsolható anyagok használata egyre nagyobb teret nyer, mert az ipar egyre magasabb üzemi hőmérsékletet, korrózióállóságot és élettartamot követel meg. A hagyományos megmunkálási módszerek emitt már nem elegendőek, ezért speciális szerszámanyagokra, bevonatokra és hűtési eljárásokra van szükség. A megmunkálás hatékonyságának növelése rendszerszintű optimalizálást igényel, amely magába foglal olyanokat, mint a szerszámanyag, a szerszámgeometria, a forgácsolási paraméterek, a hűtés/kenés módszerek, eljárások alkalmazása, illetve a rezgéscsillapítás együttes kezelése.

Az élkoptató, hőtermelő és tapadási jelenségek együttes jelenléte miatt a szerszámok élettartama sokszor 1/10-e a hagyományos anyagokénak. A gyártási költségek jelentős része a szerszámcsereből, selejtből és alacsony előtolásból adódik, ebben a költségcsökkentésben tehát nagy megtakarítási potenciál van az optimalizálás során.

A nehezen forgácsolható fémek megmunkálása tehát az iparág egyik legnagyobb technológiai kihívása. A megoldás nem egyetlen tényezőben, hanem a teljes megmunkálási rendszer integrált fejlesztésében rejlik. A jövőben azok a vállalatok lesznek versenyelőnyben, amelyek:

- képesek lesznek új szerszámanyagokat és bevonatokat (nanokompozit és rétegzett bevonatok, hőszigetelő bevonatok (a hőt a forgácsba terelik), kémiai diffúziót gátló rétegek titán megmunkálásához) alkalmazni,

- intelligens és adaptív megmunkálási stratégiákat (beágyazott szenzorok (hőmérséklet, rezgés, forgácsolóerő) alkalmazása, valós idejű, AI-alapú paraméteroptimalizálás, digitális ikrek a folyamatok szimulációjához) bevezetni,
- fenntartható és hatékony hűtési technológiákat (kombinált kriogén + MQL rendszerek, környezetbarát, biológiailag lebomló kenőanyagok alkalmazása, intelligens hűtőcsatornák készítése additív gyártással) használni,
- hibrid és alternatív megmunkálási eljárásokat kifejleszteni, alkalmazni (lézer+mechanikus forgácsolás kombinációja, plazma- vagy indukciós előmelegítés a szívósság szabályozására, ultrahangos segédrezgés integrálása sorozatgyártásba),
- gyárthatósági szempontokat már az anyagtervezésbe beépíteni (olyan ötvözetek fejlesztése, amelyek továbbra is nagy teljesítményűek, de jobban forgácsolhatók, additív gyártás és a forgácsolás kombinálása a gépiparban)
- A fentebb említett önjáró forgó szerszám (SPRT), illetve az aktívan meghajtott forgó szerszám (ADRT – Actively driven rotary tool) megoldást kínálhat ezen anyagok forgácsolhatósági problémáinak megoldására. Emellett ezen szerszámok továbbfejlesztése a jövőben további kutatások témája lehet, melyekből szakdolgozatok, tudományos munkák, vagy doktori értekezések nagy száma születhet.

Irodalomjegyzék

- [1] S. Sándor, "Forgácsolólapkák hatékonysági vizsgálatának új módszere," 2018, Accessed: Nov. 26, 2025. [Online]. Available: <https://oda.uni-obuda.hu/handle/20.500.14044/24300>
- [2] H. A. Kishawy, C. E. Becze, and D. G. McIntosh, "Tool performance and attainable surface quality during the machining of aerospace alloys using self-propelled rotary tools," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 152, no. 3, pp. 266–271, Oct. 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.011.
- [3] "Lecture notes on Difficult to machine Materials by Dr. Raviraj Shetty-3-1."
- [4] A. Shokrani, V. Dhokia, and S. T. Newman, "Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 57, pp. 83–101, June 2012, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2012.02.002.
- [5] G. R. Thellaputta, P. S. Chandra, and C. S. P. Rao, "Machinability of Nickel Based Superalloys: A Review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, Part A, pp. 3712–3721, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.02.266.
- [6] "Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties | Journal of Propulsion and Power." Accessed: Nov. 26, 2025. [Online]. Available: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.18239>
- [7] D. K. Ganji and G. Rajyalakshmi, "Influence of Alloying Compositions on the Properties of Nickel-Based Superalloys: A Review," in *Recent Advances in Mechanical Engineering*, H. Kumar and P. K. Jain, Eds., Singapore: Springer, 2020, pp. 537–555. doi: 10.1007/978-981-15-1071-7_44.
- [8] D. V. V. Satyanarayana and N. Eswara Prasad, "Nickel-Based Superalloys," in *Aerospace Materials and Material Technologies: Volume 1: Aerospace Materials*, N. E. Prasad and R. J. H. Wanhill, Eds., Singapore: Springer, 2017, pp. 199–228. doi: 10.1007/978-981-10-2134-3_9.
- [9] M. Zielińska, M. Yavorska, M. Poręba, and J. Śieniawski, "Thermal properties of cast nickel based superalloys".
- [10] "Development of strong, oxidation and corrosion resistant nickel-based superalloys: critical review of challenges, progress and prospects - R. Darolia, 2019." Accessed: Nov. 27, 2025. [Online]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1080/09506608.2018.1516713>
- [11] Q. Zhang, Y. Chang, L. Gu, Y. Luo, and B. Ge, "Study of microstructure of nickel-based superalloys at high temperatures," *Scripta Materialia*, vol. 126, pp. 55–57, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.scriptamat.2016.08.013.
- [12] M. Kuntoğlu *et al.*, "A review on microstructure, mechanical behavior and post processing of additively manufactured Ni-based superalloys," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 30, no. 9, pp. 1890–1910, Aug. 2024, doi: 10.1108/RPJ-10-2023-0380.
- [13] G. R. Thellaputta, P. S. Chandra, and C. S. P. Rao, "Machinability of Nickel Based Superalloys: A Review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, Part A, pp. 3712–3721, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.02.266.
- [14] "Nickel based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications - M. B. Henderson, D. Arrell, R. Larsson, M. Heobel, G. Marchant, 2004." Accessed: Nov. 26, 2025. [Online]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1179/136217104225017099>
- [15] H. Yurtkuran, "An Evaluation on Machinability Characteristics of Titanium and Nickel Based Superalloys Used in Aerospace Industry," *MATECA*, vol. 2, no. 2, pp. 10–29, Aug. 2021, doi: 10.52795/mateca.940261.
- [16] D. Ma, A. D. Stoica, Z. Wang, and A. M. Beese, "Crystallographic texture in an additively manufactured nickel-base superalloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 684, pp. 47–53, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.msea.2016.12.028.
- [17] G. Kónya and Z. F. Kovács, "Effects of Oil Concentration in Flood Cooling on Cutting Force, Tool Wear and Surface Roughness in GTD-111 Nickel-Based Superalloy Slot Milling," *JMMP*, vol. 8, no. 3, p. 119, June 2024, doi: 10.3390/jmmp8030119.

- [18] G. Kónya and Z. F. Kovács, "Experimental investigation of the effects of cooling-lubricating methods on the slot milling process of GTD-111 type nickel-based superalloy," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 119, pp. 98–108, June 2024, doi: 10.1016/j.jmapro.2024.03.074.
- [19] M. Najafizadeh *et al.*, "Classification and applications of titanium and its alloys: A review," *Journal of Alloys and Compounds Communications*, vol. 3, p. 100019, Sept. 2024, doi: 10.1016/j.jacomc.2024.100019.
- [20] H. Heegn, K. B. Mueller, and M. Koch, "Extrusion of mechanically alloyed titanium aluminide powder. Pt. 2; Strangpressen von mechanisch legiertem Titan-Aluminid-Pulver. T. 2," *Aluminium (Duesseldorf)*, vol. 75, Apr. 1999, Accessed: Nov. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/347200>
- [21] G. R. Thellaputta, P. S. Chandra, and C. S. P. Rao, "Machinability of Nickel Based Superalloys: A Review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, Part A, pp. 3712–3721, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.02.266.
- [22] "Advanced Machining of Titanium- and Nickel-Based Alloys | SpringerLink." Accessed: Nov. 26, 2025. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7091-2678-3_2
- [23] Y. Gao, G. Wang, and B. Liu, "Chip formation characteristics in the machining of titanium alloys: a review," *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, vol. 18, no. 1–2, pp. 155–184, Jan. 2016, doi: 10.1504/IJMMM.2016.075467.
- [24] C. Machai and D. Biermann, "Machining of β -titanium-alloy Ti–10V–2Fe–3Al under cryogenic conditions: Cooling with carbon dioxide snow," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, no. 6, pp. 1175–1183, June 2011, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.01.022.
- [25] F. Klocke, M. Zeis, A. Klink, and D. Veselovac, "Experimental Research on the Electrochemical Machining of Modern Titanium- and Nickel-based Alloys for Aero Engine Components," *Procedia CIRP*, vol. 6, pp. 368–372, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.03.040.
- [26] C. Machai and D. Biermann, "Machining of β -titanium-alloy Ti–10V–2Fe–3Al under cryogenic conditions: Cooling with carbon dioxide snow," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, no. 6, pp. 1175–1183, June 2011, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.01.022.
- [27] A. Yu. Churyumov *et al.*, "Study of the structure and mechanical properties of corrosion-resistant steel with a high concentration of boron at elevated temperatures," *Phys. Metals Metallogr.*, vol. 115, no. 8, pp. 809–813, Aug. 2014, doi: 10.1134/S0031918X14080031.
- [28] "New steels and corrosion-resistant alloys," in *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies*, Woodhead Publishing, 2017, pp. 613–626. doi: 10.1016/B978-0-08-101105-8.00026-7.
- [29] "Corrosion and Age Hardening Studies Of Some Cast Stainless Alloys Containing Ferrite* | CORROSION | Association for Materials Protection and Performance." Accessed: Nov. 26, 2025. [Online]. Available: <https://content.ampp.org/corrosion/article-abstract/19/5/186t/2811/Corrosion-and-Age-Hardening-Studies-Of-Some-Cast?redirectedFrom=fulltext>
- [30] F. Beck, J. Juppenlatz, and P. Wieser, "Effects of Ferrite and Sensitization on Intergranular and Stress-Corrosion Behavior of Cast Stainless Steels," in *Stress Corrosion—New Approaches*, vol. STP610-EB, H. Craig Jr, Ed., ASTM International, 1976, p. 0. doi: 10.1520/STP28691S.
- [31] C. Zhang, K. Yamanaka, H. Bian, and A. Chiba, "Corrosion-resistant carbide-reinforced martensitic steel by Cu modification," *npj Mater Degrad.*, vol. 3, no. 1, p. 30, Aug. 2019, doi: 10.1038/s41529-019-0092-3.
- [32] "SciELO Brazil - Deformation induced martensite in an AISI 301LN stainless steel: characterization and influence on pitting corrosion resistance Deformation induced martensite in an AISI 301LN stainless steel: characterization and influence on pitting corrosion resistance." Accessed: Nov. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.scielo.br/j/mr/a/v7tjVBFmtqhR3MWf4jWm9FG/?format=html&lang=en>
- [33] V. G. Gavriljuk, B. D. Shanina, and H. Berns, "Ab initio development of a high-strength corrosion-resistant austenitic steel," *Acta Materialia*, vol. 56, no. 18, pp. 5071–5082, Oct. 2008, doi: 10.1016/j.actamat.2008.06.021.
- [34] G. Chai, J.-O. Nilsson, M. Boström, J. Högberg, and U. Forsberg, "Advanced Heat Resistant Austenitic Stainless Steels," in *Advanced Steels*, Y. Weng, H. Dong, and Y. Gan, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer, 2011, pp. 385–397. doi: 10.1007/978-3-642-17665-4_40.
- [35] H. Hwang and Y. Park, "Effects of Heat Treatment on the Phase Ratio and Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel," *Materials Transactions*, vol. 50, no. 6, pp. 1548–1552, 2009, doi: 10.2320/matertrans.MER2008168.
- [36] G. Kónya and Z. F. Kovács, "Effects of machining parameters, coolant oil composition, and coatings on the output characteristics of turning of X5CrNi18-10 stainless steel," *Wear*, vol. 570, p. 205893, June 2025, doi: 10.1016/j.wear.2025.205893.
- [37] G. Kónya, J. Takács, I. Miskolczi, and Z. F. Kovács, "Investigation of the effects of machining parameters on cutting conditions during orthogonal turning of austenite stainless steel," *Production Engineering Archives*, vol. 30, no. 1, pp. 86–93, Mar. 2024, doi: 10.30657/pea.2024.30.8.
- [38] A. Hamdan, A. A. D. Sarhan, and M. Hamdi, "An optimization method of the machining parameters in high-speed machining of stainless steel using coated carbide tool for best surface finish," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 58, no. 1, pp. 81–91, Jan. 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3392-5.
- [39] A. Hamdan, A. A. D. Sarhan, and M. Hamdi, "An optimization method of the machining parameters in high-speed machining of stainless steel using coated carbide tool for best surface finish," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 58, no. 1, pp. 81–91, Jan. 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3392-5.
- [40] M. Szala *et al.*, "Effect of Annealing Time and Temperature Parameters on the Microstructure, Hardness, and Strain-Hardening Coefficients of 42CrMo4 Steel," *Materials*, vol. 13, no. 9, Apr. 2020, doi: 10.3390/ma13092022.
- [41] M. Bayrak, F. Ozturk, M. Demirezen, and Z. Evis, "Analysis of Tempering Treatment on Material Properties of DIN 41Cr4 and DIN 42CrMo4 Steels," *J. of Materi Eng and Perform*, vol. 16, no. 5, pp. 597–600, Oct. 2007, doi: 10.1007/s11665-007-9043-1.

- [42] "Cutting performance of tools made of different materials in the machining of 42CrMo4 high-strength steel: a comparative study | The International Journal of Advanced Manufacturing Technology." Accessed: Nov. 26, 2025. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-0666-6>
- [43] Q. Xu, J. Zhao, and X. Ai, "Cutting performance of tools made of different materials in the machining of 42CrMo4 high-strength steel: a comparative study," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 93, no. 5, pp. 2061–2069, Nov. 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0666-6.
- [44] A. Vazdirvanidis, G. Pantazopoulos, and A. Louvaris, "Failure analysis of a hardened and tempered structural steel (42CrMo4) bar for automotive applications," *Engineering Failure Analysis*, vol. 16, no. 4, pp. 1033–1038, June 2009, doi: 10.1016/j.engfailanal.2008.05.006.