

Sorjázási folyamat minőségfejlesztése PDCA-ciklus és vizuális menedzsment alkalmazásával

Quality improvement of the deburring process using PDCA cycle and visual management

Radics Renáta ^{1*}

¹ Innovatív Anyagok és Járművek Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország, <https://orcid.org/0009-0003-4347-2307>
<https://doi.org/10.47833/2026.1.ENG.017>

Kulcsszavak:

sorjázás
optimalizálás
PDCA-ciklus
vizuális menedzsment
FMEA

Keywords:

deburring
optimisation
PDCA cycle
visual management
Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

Cikktörténet:

Beérkezett 2025. november 25.
Átdolgozva 2026. április 2.
Elfogadva 2026. április 8.

Összefoglalás

A tanulmány egy autóiipari beszállító sorjaeltávolítási folyamatának minőségfejlesztését mutatja be az A típusú öntött alumínium termékcsalád példáján. A meglévő, nagyrészt kézi sorjaeltávolításra épülő technológia elemzését követően ismertetjük a cég által kidolgozott, részben gépesített, színekódolt dummy-val támogatott, optimalizált forgácseltávolítási koncepciót, amelyet a vevő ISO 9001 alapú rendszerébe illesztettünk. A PDCA-logika mentén Pareto-, Ishikawa- és FMEA-alapú kockázatértékelési elemek, valamint vizuális menedzsment eszközök segítségével azonosítjuk és rangsoroljuk a sorjaeltávolítás főbb hibaforrásait, majd célzott beavatkozásokat határozunk meg. Az esettanulmány alapját képező eredeti projekt munka nyolc termékcsalád vizsgálatára és az azt megelőző 1. negyedéves kimutatásokra épült; a továbbvizsgálás a négy legnagyobb időráfordítású termékcsaládra fókuszált, amelyek együtt az összes ráfordítás 63%-át tették ki. Az A típusú termékcsalád esetében 12 sorjaeltávolítási pontot azonosítottunk. A CAM Consulting normaidő-bebecslése alapján az optimalizált műveletterv bevezetésével a sorjaeltávolítás átlagideje nagyjából 64 másodpercre csökkenthető. A bemutatott megközelítés elsődleges eredménye a folyamat standardizálhatóságának, átláthatóságának és minőségirányítási rendszerbe illeszthetőségének javítása.

Abstract

The paper presents the quality improvement of a deburring process at an automotive supplier using an A-type aluminium cast product family as a case study. After analysing the existing, mainly manual deburring operations, an optimised chip-removal concept developed by the company is introduced, combining partial reallocation of selected operations to CNC machines with standardised manual steps supported by harmonised tooling and a colour-coded dummy, and integrated into the customer's ISO 9001-based quality system. Following the PDCA cycle, the study applies Pareto analysis, Ishikawa analysis, FMEA-based risk

* Kapcsolattartó szerző.
E-mail cím: radics.renata@nje.hu

assessment elements and visual management tools to identify, prioritise and address the main causes of deburring-related problems. The original project background covered eight product families and was based on first-quarter internal records; the detailed follow-up focused on the four most time-consuming product families, which together accounted for 63% of the total deburring time. In the A-type product family, 12 deburring points were identified. Based on the average standard times measured by CAM Consulting, the optimised operating plan could reduce deburring time to approximately 64 seconds. The main contribution of the study is the improvement of process standardisation, transparency and integration into the quality management system.

1. Bevezetés

A forgácsolási műveletek során keletkező sorják a legtöbb gyártóüzem számára egyszerre jelentenek minőségügyi és költségbeli kihívást. A sorja nem növeli a termék funkcionális értékét, ugyanakkor beavatkozást igényel: eltávolítása nélkül romlik a méret- és alaktűrések betartása, nő a beépítés nehézsége, illetve nő a sérülés- és meghibásodás-kockázat [1–3]. A sorjaeltávolítás tipikus, nem értékteremtő, de elkerülhetetlen tevékenység, amelynek racionalizálása közvetlenül hat a versenyképességre.

Az autóiiparban, ahol a beszállítói láncokat szigorú minőségi, környezetvédelmi és nyomonkövethetőségi követelmények szabályozzák (pl. ISO 9001, IATF 16949), a stabil, reprodukálható sorjaeltávolítási folyamat alapfeltétel a vevői elégedettség és a hosszú távú együttműködés szempontjából [4]. A gyártó vállalatok egyre nagyobb hangsúlyt helyeznek a sorjaképződés megelőzésére, a szükséges kézi beavatkozások minimalizálására és a folyamatok vizuális, egyértelmű szabályozására [1–3].

Jelen tanulmány alapját egy autóiipari beszállító forgácsoló üzemének esettanulmánya képezi, ahol egy cég által kidolgozott optimalizált forgácseltávolítási koncepciót kellett a vevő minőségirányítási rendszerébe illeszteni. A cél a sorjaeltávolítási folyamat átláthatóvá tétele, a hibák ok-okozati összefüggéseinek feltárása, valamint a PDCA-ciklusnak megfelelő folyamatos fejlesztés megvalósítása volt [5–7].

2. Irodalmi áttekintés

A következő alfejezetek a sorjaeltávolítási folyamat minőségfejlesztésének elméleti hátterét foglalják össze, amelyre a későbbi esettanulmány épül. Először a sorjaképződés fizikai jelenségét és a különböző sorjázási technológiákat tekintjük át, majd bemutatjuk a minőségirányítási rendszerekben alkalmazott PDCA-ciklus szerepét és a hozzá kapcsolódó gyökérok-elemző eszközöket. Végül a kockázatalapú hibakezelést támogató FMEA-módszert, valamint a sorjaeltávolítási folyamat stabilizálását segítő vizuális menedzsment eszközeit ismertetjük.

2.1. Sorjaképződés és sorjázási technológiák

A sorjaképződés mechanizmusát számos kutatás vizsgálta különböző forgácsoló eljárások (fúrás, marás, esztergálás) esetén. Dornfeld és Min átfogó áttekintése kiemeli, hogy a sorjaméretet és -geometriát a szerszám-munkadarab kölcsönhatás, az anyagképlékenység, valamint a forgácsolási paraméterek (előtolás, vágósebesség, fogásmélység) együttesen határozzák meg [1]. Niknam és mtsai marási sorjákról szóló irodalmi összefoglalója rámutat, hogy a sorjaképződés nagyban függ a forgácstörés, a kifizési geometria és a rezgések állapotától [2].

Kísérleti vizsgálatok igazolták, hogy a megmunkálási paraméterek célzott optimalizálása révén a sorjaméret jelentősen csökkenthető. Zaidi és munkatársai alumíniumötvözet nagyoló marásánál statisztikai módszerekkel elemezték a burr-szélességet, a felületi érdességet és az energiafogyasztást, és kimutatták, hogy a vágósebesség és a lapkák száma kiemelt hatású tényezők [3]. Hasonló eredmények születtek fűrési kísérletekben is, ahol a Taguchi-módszerrel

optimalizált paraméterekkel a sorja magassága és a szerszámkopás egyaránt mérsékelhető volt [8–10].

A sorjaképződés alapjelenségeinek jobb megértésére irányuló kutatások – például Kim és Dornfeld analitikus modelljei, illetve kilépési felület-szögre vonatkozó vizsgálatai – részletes összefüggéseket tártak fel a geometriai paraméterek és a sorja alakja között [10–11]. Ezek a modellek támogatják a deburring-stratégiák és a művelettervek előzetes tervezését, minimalizálva a későbbi kézi utómunkát.

Az ipari gyakorlatban egyre nagyobb teret nyernek az automatizált sorjázó megoldások: kollaboratív robotokkal végzett élettörés és kontúrkövető, erőszabályozott sorjázás [12–13]. Falandys és mtsai kollaboratív robot alkalmazásával valósítottak meg automatizált élettörést, míg Burghardt és munkatársai erőszabályozott robotsorjázást optimalizáltak, jelentős ciklusidő-csökkenést és reprodukálható élminőséget elérve [12–13]. Ugyanakkor a magas beruházási költségek és a termékváltások rugalmassági igénye miatt számos kis- és közepes vállalatnál továbbra is a kézi sorjaeltávolítás dominál, ami indokoltá teszi a folyamat minőségügyi alapú racionalizálását.

2.2. PDCA és gyökérokelemzés

Az ISO 9001:2015 szabvány folyamatszempléltű megközelítést és kockázatalapú gondolkodást ír elő a minőségirányítási rendszerek számára [4]. A PDCA-ciklus (Plan–Do–Check–Act) az egyik legelterjedtebb logikai keret a folyamatok tervezéséhez, végrehajtásához, ellenőrzéséhez és fejlesztéséhez. Realyvásquez-Vargas és munkatársai esettanulmányban mutatták be, hogy a PDCA tudatos alkalmazása egy termelő vállalatnál jelentősen csökkentette a hibaarányt és a selejt költségét [5].

A PDCA gyakorlati megvalósítását támogatják a különböző minőségügyi eszközök. Az Ishikawa-diagram és az 5 Miért módszer strukturált módon segítik a gyökérok azonosítását; Ciecínska részletes elméleti és gyakorlati áttekintést ad ezen módszerek alkalmazásáról [14]. Pietsch és mtsai rendszerezett irodalmi áttekintése ugyanakkor rámutat, hogy a gyökérokelemzési eszközök gyakran ad hoc módon jelennek meg a vállalati gyakorlatban, és csak akkor hoznak tartós eredményt, ha illeszkednek a szervezet kultúrájához és döntéshozatali folyamataihoz [15].

A jelen esettanulmányban a PDCA-logika a sorjaeltávolítási folyamat újratervezésének vezérfonalaként szolgált: a tervezési fázisban feltártuk a hibák okait, a „Do” szakaszban vizuálisan támogatott új munkautasítást vezettünk be, az ellenőrzési fázisban gyűjtött adatokat pedig a további fejlesztési lépések megalapozására használtuk fel [5–6, 14–15].

2.3. FMEA és vizuális menedzsment

A kockázatalapú gondolkodás egyik klasszikus eszköze a hibamód- és hibahatás-elemzés (FMEA), amelyet eredetileg a repülő- és autóiparban dolgoztak ki, mára azonban széles körben alkalmaznak egészségügytől a gyártásig. El-Awady áttekintő munkája kiemeli, hogy az FMEA ereje a multidiszciplináris csoportmunkában, a hibamódok strukturált azonosításában és a prioritások meghatározásában rejlik [16]. Sader és mtsai ugyanakkor rávilágítanak, hogy a hagyományos FMEA szubjektivitása csökkenthető adatalapú, gépi tanulási módszerekkel [17].

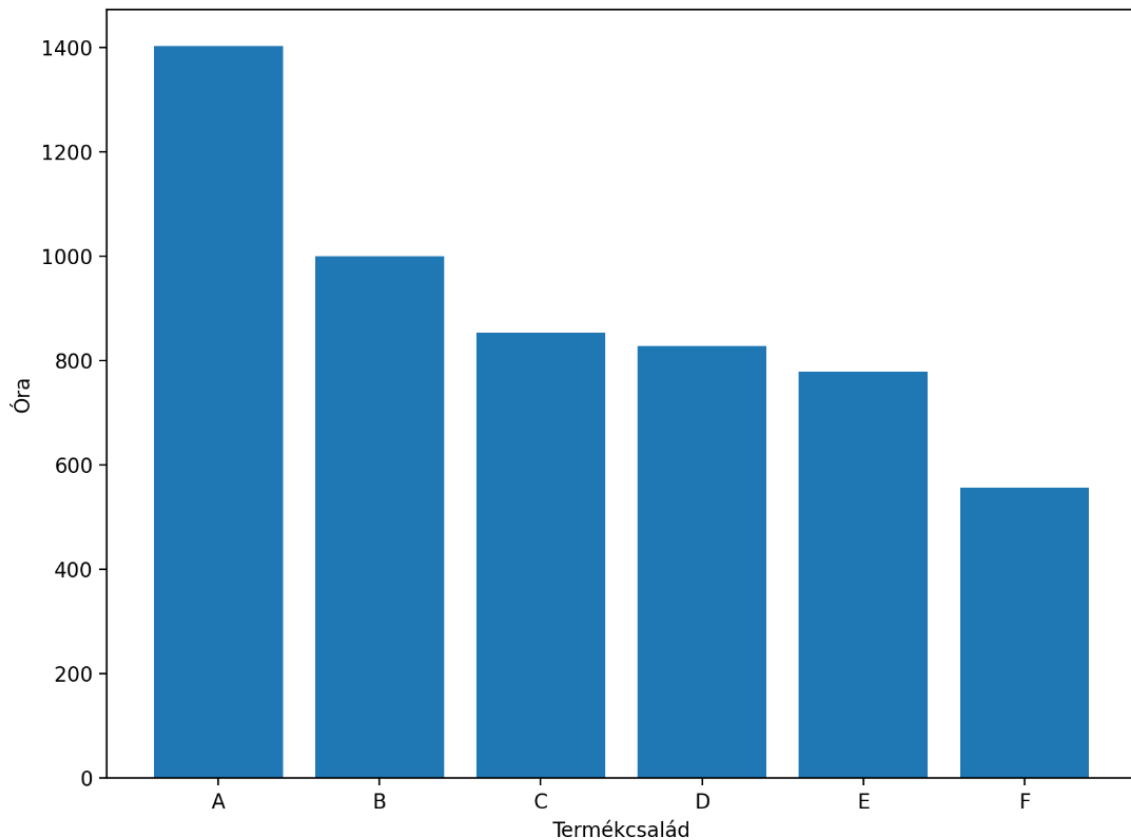
A vizuális menedzsment eszközei – táblák, színekódok, piktogramok – kulcsszerepet játszanak a lean alapú folyamatszabályozásban. Eaidgah és szerzőtársai integrált vizuális menedzsment (IVM) keretrendszer javasoltak, amelyben a vizuális eszközök szorosan kapcsolódnak a teljesítménymenedzsmenthez és a folyamatos fejlesztéshez [6]. Von Haartman és mtsai pedig az Ipar 4.0 környezetben vizsgálták a digitális vizuális táblák előnyeit és hátrányait; eredményeik szerint a transzparencia és az adatmegosztás javulása jelentősen támogatja a problémamegoldást és a csapatmunkát [18].

A sorjaeltávolítási folyamatok esetén a vizuális menedzsment különösen fontos, mivel a termékek geometriai sokfélesége és a kézi beavatkozásból adódó variancia magas hibakockázatot hordoz. A színekódolt eszközök, grafikus munkalapok és dummy-k alkalmazása csökkentheti a hibás műveletsorrend és az eszközválasztás tévesztésének valószínűségét, és lehetővé teszi a gyors betanítást új dolgozók számára [6–7, 18].

3. Esettanulmány: sorjaeltávolítási folyamat egy autóiipari beszállítónál

A vizsgált autóiipari beszállító öntött alumínium termékeket gyárt CNC megmunkálással, majd kézi utómegmunkálással. A félkész termékek a forgácsolási műveletek után a szereldébe kerülnek, ahol több további alkatrészsel együtt készre szerelik és ellenőrzik őket [7]. A cég tanácsadói feladata az volt, hogy a sorjaeltávolítási folyamatot a megrendelő meglévő művelettervének felülvizsgálatával és optimalizálásával fejlessze.

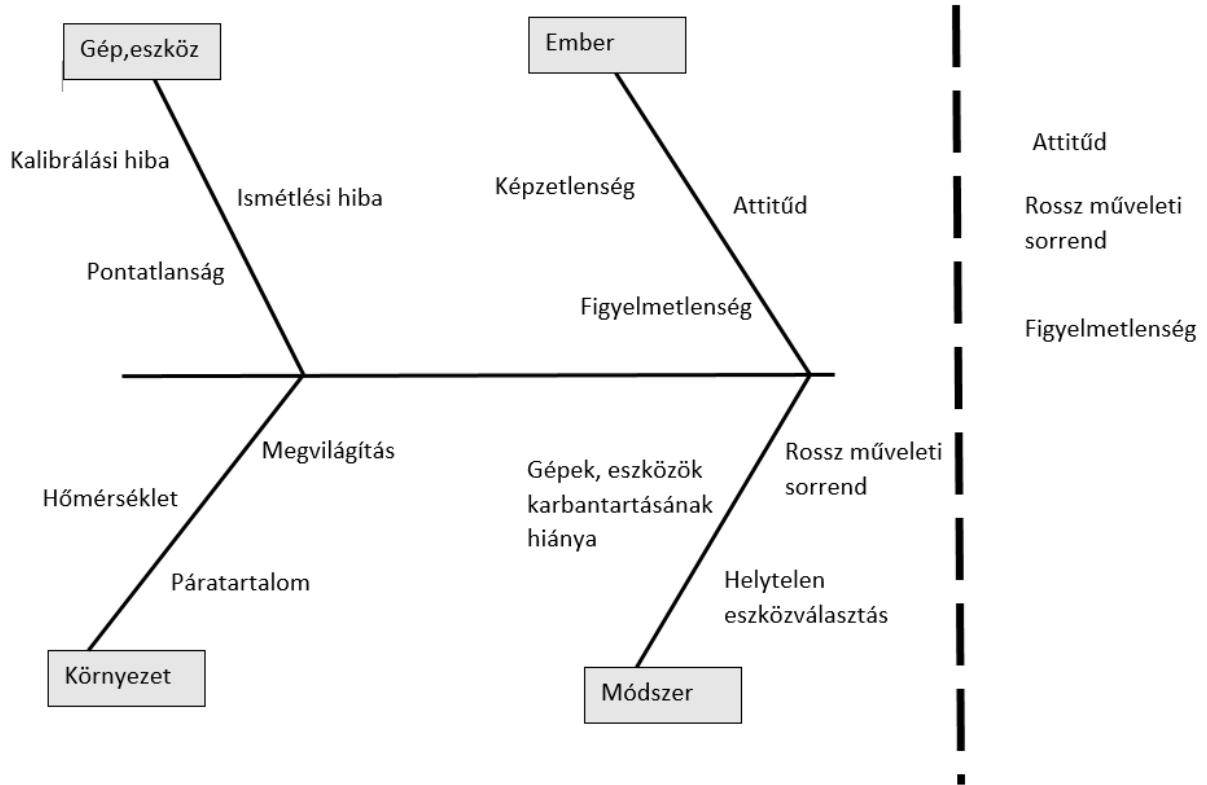
Az esettanulmány alapját képező eredeti projekt munka nyolc termékcsalád vizsgálatára épült, és az azt megelőző 1. negyedéves kimutatások adatait használta fel. A termékcsaládok közül a továbbvizsgálásba a négy legnagyobb időráfordítást igénylő csoport került be, mivel ezek együttesen az összes sorjaeltávolítási ráfordítás 63%-át tették ki. A részletes elemzés fókuszába az A típusú termékcsalád került, amely a vizsgált termékek közül a legnagyobb időráfordítással szerepelt.



1. ábra A vizsgált termékcsaládok sorjaeltávolítási időráfordítása

Az ábra a vizsgált hat termékcsalád sorjaeltávolítási időráfordítását mutatja be. Jól látható, hogy az A és B termékcsalád időigénye jelentősen meghaladja a többi vizsgált csoportét, ezért ezek részletesebb elemzése szakmailag indokolt.

A kiinduló helyzetben az A típusú termékcsaládban 12 sorjaeltávolítási pontot azonosítottak. A folyamat döntően kézi műveletekre épült, a munkavégzést pedig elsősorban szöveges munkautasítás támogatta. A helyszíni megfigyelések és az Ishikawa-elemzés alapján a fő problémák közé tartozott a munkautasítások értelmezhetősége, az eszközválasztás bizonytalansága, valamint a műveleti sorrend következetlen alkalmazása. [7].



2. ábra Sorjázási időráfordítás termékcsopontonként és Ishikawa-diagram a főbb hibaokokról

Az 1. ábrán bemutatott elemzés szerint az egyes termékcsoportok eltérő arányban részesedtek a sorjaeltávolítási időráfordításból: néhány kritikus termék aránytalanul nagy kapacitást kötött le. A kapcsolódó Ishikawa-diagram a fő hibaokokat az emberi tényezők, a módszer, az eszközök és a környezet kategóriába rendezte, rámutatva a munkautasítások hiányosságaira, az eszközválasztás bizonytalanságára és az oktatás elégtelenségére [7, 14–15].

4. Módszertan: PDCA-alapú beavatkozások a sorjaeltávolítási folyamatban

Ezek az alfejezetek a sorjaeltávolítási folyamat fejlesztésének PDCA-logika szerinti gyakorlati megvalósítását mutatják be. A Plan szakasz a kiinduló állapot részletes feltérképezésére és az ok-okozati összefüggések azonosítására fókuszál, a Do szakasz a vizuálisan támogatott új munkautasítás kialakítását ismerteti, míg a Check fázis a bevezetett intézkedések hatásának mérésére és értékelésére koncentrál. Végül az Act szakasz a standardizálás, az oktatásba való beépítés és a további fejlesztési irányok kijelölése révén biztosítja, hogy az elért eredmények tartósan beépüljenek a minőségirányítási rendszerbe.

4.1. Plan – helyzetfelmérés és ok-okozati elemzés

A „Plan” szakaszban a meglévő sorjaeltávolítási folyamat részletes feltérképezése történt: a műveletek időráfordítását, sorrendjét és az alkalmazott eszközöket dokumentálták. A gyűjtött adatok alapján Pareto-elemzés készült a termékcsoportok sorjaeltávolítási időben való részesedéséről, amely segített azonosítani a fejlesztésre szoruló kritikus termékcsaládokat [3, 5, 7].

A hibaokok feltárására Ishikawa-diagramot és 5 Miért elemzést alkalmaztak, a kategóriákat a klasszikus „ember-gép-módszer-anyag-mérés-környezet” felosztás szerint strukturálva [14–15]. A legfontosabb okok között szerepelt a sorjaeltávolító szerszámok nem egyértelmű hozzárendelése a sorjaeltávolítási pontokhoz, a vizuális támpontok hiánya, valamint az, hogy az ellenőrzés csak a készreszerelés előtti végellenőrzési ponton történt, így az esetleges hibák későn derültek ki.

A kritikus termékcsaládok kiválasztása időráfordítási alapon történt. A részletesebb elemzéshez felhasznált adatok az eredeti projekt munka 1. negyedéves belső kimutatásaiból származtak. A Pareto-elv szerinti fókuszálás lehetővé tette, hogy a fejlesztési beavatkozások a legnagyobb kapacitáslekötést jelentő termékcsaládokra irányuljanak. Az A típusú termékcsalád esetében a további vizsgálat célja nem elsősorban a forgácsolási paraméterek közvetlen optimalizálása, hanem a meglévő kézi sorjaeltávolítási műveletek szervezési racionalizálása, vizuális támogatása és minőségirányítási szempontú standardizálása volt.

4.2. Do – vizuálisan támogatott új munkautasítás

A „Do” fázisban a Cég új, vizuálisan támogatott sorjaeltávolítási munkautasítást dolgozott ki az A típusú termékcsaládra. Az új utasítás egyértelműen meghatározza a sorjaeltávolítási pontok sorrendjét, az alkalmazandó szerszámokat és azok színkódjait. A gyártóüzemben egy ún. „dummy”, azaz felfestett oktatódarab került kihelyezésre, amelyen színekkel jelölték az egyes sorjaeltávolítási pontokat és a hozzájuk tartozó eszközöket [6–7, 18]. A dummy nem a műszaki rajz helyettesítésére, hanem a munkautasítás gyorsabb és egyértelműbb értelmezésének támogatására szolgált. Az új munkautasításban az egyes műveleti pozíciókhoz hozzárendelt eszközöket azonos színjelölés kapcsolta össze a dummy-n megjelölt sorjaeltávolítási pontokkal. Ezzel a megoldással a folyamat kevésbé vált függővé a dolgozók műszaki rajzolvadási készségétől, és jobban támogathatóvá vált a betanítás, az önellenőrzés és a vizuális összehasonlítás.

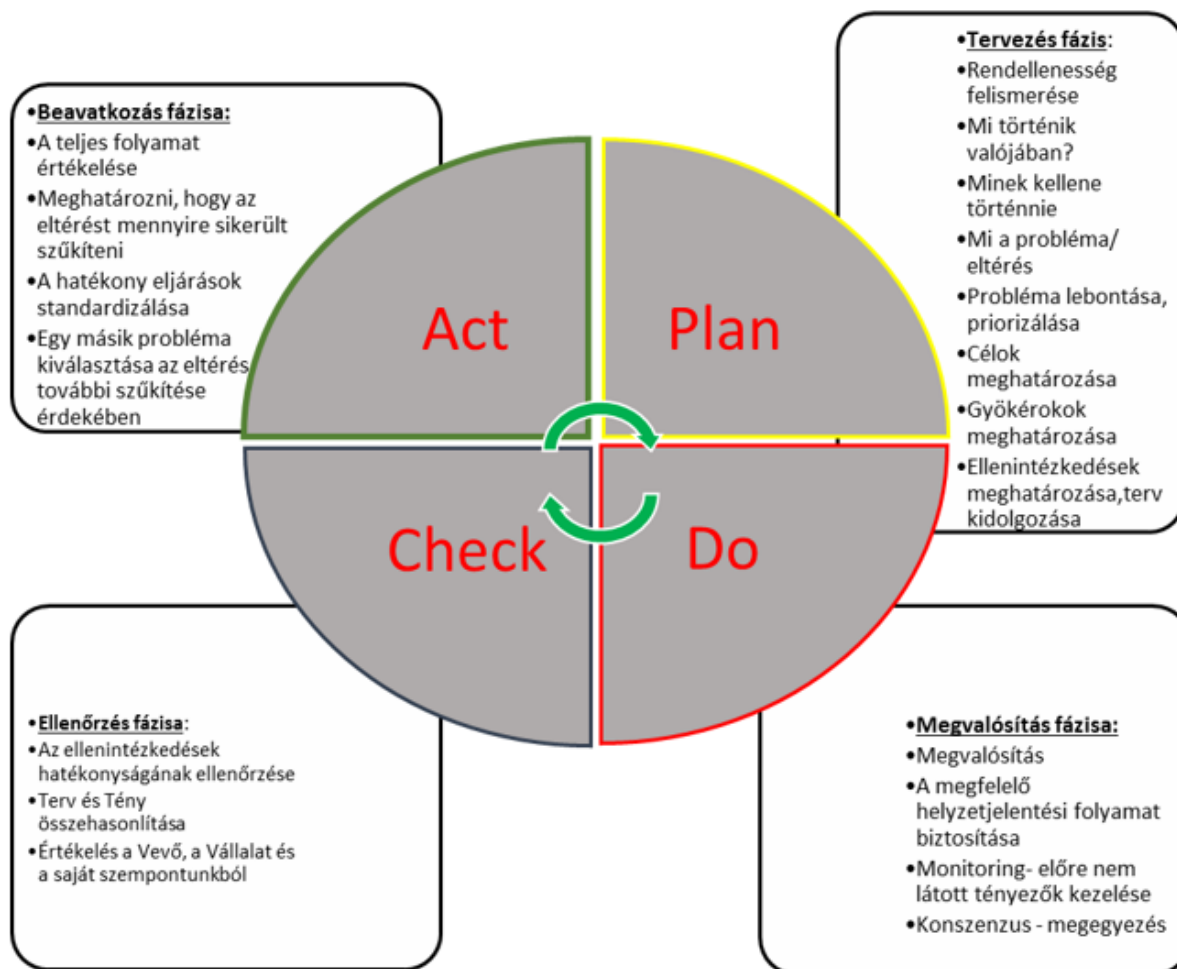
A színkódolás és a grafikus ábrázolás logikája illeszkedik a vizuális menedzsment nemzetközi gyakorlatához, amely a gyors információátadást és az eltérések azonnali észlelését támogatja [6, 18]. A munkautasítás kiegészült a szükséges személyi és tárgyi feltételek, valamint a felelősségi körök pontos meghatározásával, ami a későbbi auditálhatóság szempontjából is kulcsfontosságú.

4.3. Check – teljesítménymérés és visszacsatolás

A „Check” fázisban a tervezett változtatások megfelelőségét, a munkautasítás betarthatóságát és a vizuális támogatás gyakorlati alkalmazhatóságát értékeltük. A kialakított rendszer elsődleges célja az volt, hogy a sorjaeltávolítási műveletek végrehajtása egyértelműbbé, standardizáltabbá és könnyebben ellenőrizhetővé váljon. A rendelkezésre álló dokumentáció alapján a beavatkozások teljes körű statisztikai igazolása nem állt rendelkezésre, ezért a jelen tanulmány a fejlesztés strukturális és minőségirányítási eredményeire fókuszál. [5–6, 18].

4.4. Act – standardizálás és további fejlesztési irányok

Az „Act” szakaszban a sikeresnek bizonyult megoldásokat beépítették a szervezet szabályozott folyamataiba. A színkódolt sorjaeltávolítási utasítás és a dummy kötelező elemévé vált az új dolgozók oktatásának, és évente legalább egyszeri ismétlő képzést írtak elő a fenntartás érdekében [6–7, 18]. A vizsgálat egyúttal rámutatott további fejlesztési lehetőségekre, például a sorjaeltávolítási pontok számának csökkentésére és hosszabb távon robotizált sorjázási megoldások bevezetésére [8, 12–13].



3. ábra A PDCA-ciklus szerepe a sorjázási folyamat folyamatos fejlesztésében

5. Eredmények és megvitatás

A fejlesztés eredményeként olyan munkautasítási és vizuális támogatási rendszer jött létre, amely az A típusú termékcsalád sorjaeltávolítási pontjait, az alkalmazandó eszközöket és azok sorrendjét egyértelműbben jeleníti meg, mint a korábbi, döntően szöveges és műszaki rajz alapú megoldás. A CAM Consulting által mért normaidők átlaga alapján az optimalizált műveletterv bevezetésével a sorjaeltávolítás átlagideje nagyjából 64 másodpercre csökkenthető. A fejlesztés elsődleges eredménye a folyamat standardizálhatóságának, átláthatóságának és minőségirányítási szempontú megerősítésének javítása volt [3, 5–7, 18].

A fejlesztés jellege alapján nem önálló technológiai paraméter-optimalizálásról, hanem a kézi sorjaeltávolítási folyamat szervezési racionalizálásáról, a gépre áthelyezhető műveletek részleges elkülönítéséről, valamint a munkautasítás vizuális és minőségirányítási megerősítéséről beszélhetünk. A színekódolt dummy és az átdolgozott munkautasítás a folyamat standardizálhatóságát, átláthatóságát és reprodukálhatóságát javította. [1–3, 6, 14–15, 18].

Az esettanulmány eredményei összhangban vannak a szakirodalom azon megállapításaival, amelyek szerint a vizuális menedzsment, a gyökérok-elemzés és a folyamatközpontú fejlesztési logika különösen a kézi beavatkozást igénylő, variábilis gyártási műveletek esetében járulhat hozzá a hibakockázatok csökkentéséhez és a folyamatok jobb szabályozhatóságához.

6. Következtetések

A tanulmány bemutatta, miként alkalmazható a PDCA-ciklus, az Ishikawa-elemzés és a vizuális menedzsment eszköztára egy autóipari beszállító sorjaeltávolítási folyamatának minőségfejlesztésében, kiegészítve FMEA-alapú kockázatértékelési szempontokkal. A cég által kidolgozott optimalizált forgácseltávolítási koncepció a vizsgált A típusú termékcsalád esetében alkalmasnak bizonyult arra, hogy a vevő ISO 9001 alapú minőségirányítási rendszerébe jobban illeszthető, vizuálisan támogatott és standardizálható munkautasítás formájában jelenjen meg. A bemutatott fejlesztés elsődleges értéke abban rejlik, hogy jelentős beruházás nélkül, elsősorban szervezési, oktatási és vizuális menedzsment eszközökkel javítható a kézi sorjaeltávolítási műveletek egyértelműsége és szabályozhatósága. A továbblépés iránya egyrészt a kvantitatív teljesítménymutatók részletesebb nyomon követése, másrészt a vizuális menedzsment digitális támogatásának vizsgálata lehet.

Irodalomjegyzék

- [1] Dornfeld, D.; Min, S.: A Review of Burr Formation in Machining. In: Aurich, J. C.; Dornfeld, D. (eds.): *Burrs – Analysis, Control and Removal*. Springer, Berlin, 2010, 3–11. DOI: 10.1007/978-3-642-00568-8_1.
- [2] Niknam, S. A. et al.: Milling burr formation, modeling and control: a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2015. DOI: 10.1177/0954405414534827.
- [3] Zaidi, S. R. et al.: Statistical Analysis of Machining Parameters on Burr Formation, Surface Roughness and Energy Consumption during Milling of Aluminium Alloy Al 6061-T6. *Materials*, 15(22), 8065, 2022. DOI: 10.3390/ma15228065.
- [4] ISO 9001:2015. *Quality management systems — Requirements*. International Organization for Standardization, Geneva, 2015. DOI: —.
- [5] Realyvásquez-Vargas, A. et al.: Applying the Plan–Do–Check–Act (PDCA) Cycle to Reduce the Defects in the Manufacturing Industry. A Case Study. *Applied Sciences*, 8(11), 2181, 2018. DOI: 10.3390/app8112181.
- [6] Eaidgah, Y.; Maki, A. A.; Kurczewski, K.; Abdekhodae, A.: Visual management, performance management and continuous improvement: A lean manufacturing approach. *International Journal of Lean Six Sigma*, 7(2), 187–210, 2016. DOI: 10.1108/IJLSS-09-2014-0028.
- [7] Karen Claxton, Nicola Marie Campbell-Allen: Failure modes effects analysis (FMEA) for review of a diagnostic genetic laboratory process. *International Journal of Quality & Reliability Management Vol. 34, Issue 2, 2017*, pp. 265-277
- [8] Sreenivasulu, R.; Srinivasa Rao, T.: Investigation and optimization of tool wear and burr size in drilling of aluminium alloys. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 15(2), 2018. DOI: 10.14488/BJOPM.2018.v15.n2.a11.
- [9] Kilickap, E.: Modeling and optimization of burr height in drilling of Al-7075 using Taguchi method and response surface methodology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(9), 911–923, 2010. DOI: 10.1007/s00170-009-2469-x.
- [10] Kim, J.; Dornfeld, D.: Development of an analytical model for drilling burr formation in ductile materials. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 124(2), 192–198, 2002. DOI: 10.1115/1.1429937.
- [11] Min, S.; Dornfeld, D. A.; Nakao, Y.: Influence of exit surface angle on drilling burr formation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 125(4), 637–644, 2003. DOI: 10.1115/1.1596573.
- [12] Falandys, T. et al.: An Automation of the Edge Deburring Process with the Use of a Collaborative Robot. *Applied Sciences*, 13(17), 9646, 2023. DOI: 10.3390/app13179646.
- [13] Burghardt, A. et al.: Optimization of Process Parameters of Edge Robotic Deburring with Force Control. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 21(3), 2016. DOI: 10.1515/ijame-2016-0060.
- [14] Cieczińska, B. M.: Identification of Defects Causes: Ishikawa Diagram and 5 Whys in Theoretical and Practical Terms. In: *Quality Control – Applications in Engineering and Management*. IntechOpen, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.113990.
- [15] Pietsch, K. et al.: Root Cause Analysis in Industrial Manufacturing: A Systematic Literature Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(6), 277, 2024. DOI: 10.3390/jmmp8060277.
- [16] El-Awady, S. M. M.: Overview of Failure Mode and Effects Analysis (FMEA): A Patient Safety Tool. *Global Journal on Quality and Safety in Healthcare*, 6(1), 24–26, 2023. DOI: 10.36401/JQSH-23-X2.
- [17] Sader, S. et al.: Enhancing Failure Mode and Effects Analysis Using Auto Machine Learning: A Case Study of the Agricultural Machinery Industry. *Processes*, 8(2), 224, 2020. DOI: 10.3390/pr8020224.
- [18] von Haartman, R.; Samen, L.; Bengtsson, L.; Eriksson, S.: Visual management in the era of Industry 4.0: perceived advantages and disadvantages of digital boards. *International Journal of Advanced Operations Management*, 15(1), 24–41, 2023. DOI: 10.1504/IJAOM.2023.129524.