

1 Einleitung

Introduction

Fünf Jahre nach dem pandemiebedingten Einbruch hat der Luftfahrtsektor das Vorkrisenniveau des Jahres 2019 hinsichtlich geflogener Passagierkilometer wieder erreicht. Aufgrund des anhaltenden Weltwirtschafts- und -bevölkerungswachstums wird über die kommenden 20 Jahre eine Verdoppelung der weltweit in Betrieb befindlichen zivilen Flugzeugflotte auf dann rund 48.000 Passagier- und Frachtflugzeuge erwartet. Knapp 90 % dieser Gesamtzahl müssen bis 2043 neu in Dienst gestellt oder ersetzt werden. Auf dem Weg zu einer dekarbonisierten Luftfahrt bieten die auf diese Weise flächendeckend in den Einsatz gebrachten modernsten Triebwerke kurzfristig den größten Hebel, um die spezifischen CO₂-Emissionen weiter zügig zu senken. Sie liegen bereits heute 15 bis 25 % unterhalb ihrer Vorgängergeneration [AIRB24, IATA23, AUST23].

Diese Effizienzsteigerungen sind Resultat verbesserter Vortriebswirkungsgrade, die durch eine Erhöhung des Nebenstromverhältnisses erreicht werden. Ein solches macht eine Turbinenleistungssteigerung und damit höhere Turbineneintrittstemperaturen und -drücke zur Steigerung des thermischen Wirkungsgrades der Triebwerke erforderlich [BRÄU15]. Zur Realisierung verfolgen die Triebwerkshersteller zwei unterschiedliche Ansätze. Zum einen finden verstärkt neue, hochtemperaturfestere Werkstoffe Anwendung. Diese Strategie erfordert hohe technologische Investitionen, ist also vergleichsweise zeit-, kosten- und risikointensiv. Zum anderen erlauben die über Jahrzehnte kontinuierlich verbesserten und abgesicherten Fertigungs- und Werkstoffdaten insbesondere die dynamischen Auslegungsgrenzen auch bei etablierten Werkstoffen wie IN718 weiter auszureißen. Dadurch können Effizienzzuwächse vergleichsweise kurzfristig und kostengünstig erschlossen werden. In der Konsequenz macht die Kombination aus wachsenden Absatzzahlen einerseits und zur Effizienzsteigerung erhöhten Werkstoffanforderungen andererseits die Ausweitung fertigungstechnischer Flexibilisierungen bei den Triebwerksherstellern dringend erforderlich.

Hinsichtlich dieser Flexibilisierungsnotwendigkeit in der Triebwerksfertigung bietet der Einsatz der Drahtfunkenerosion ein vielfach erkanntes, aber bislang in der Praxis nur in geringem Umfang genutztes Potenzial. Die Drahtfunkenerosion (kurz: WEDM) ist ein unkonventionelles Fertigungsverfahren, das nahezu kraftfreien Materialabtrag mithilfe elektrischer Entladungen ermöglicht. Sie erlaubt die Fertigung bester Oberflächenqualitäten sowie die präzise Einhaltung minimaler Maßtoleranzen unabhängig von den mechanischen Werkstoffeigenschaften. Somit ist sie insbesondere prädestiniert für die Herstellung der hochbelasteten Profilnuten zur Schaufelfußaufnahme in Turbinenscheiben. Die diesbezügliche, grundsätzliche Eignung des Verfahrens wurde in den zurückliegenden Jahren ausführlich untersucht und nachgewiesen [KLOC14b, WELL14, WELL15].

Jedoch besteht bei der Technologieentwicklung für diese Anwendung eine besondere Herausforderung in der festigkeitsoptimierenden Prozessauslegung. Diese muss die

gezielte Einstellung gewünschter Randzoneneigenschaften der Bauteilfunktionsflächen gewährleisten. In der Praxis erfolgt die Entwicklung folglich in zeitintensiven iterativen Schleifen, bis der Prozess anwendungsfallspezifisch zertifiziert und eingefroren werden kann.

Diesem großteils erfahrungsbasierten Konzept der Prozessentwicklung wird mit dem Ansatz der Prozesssignatur begegnet. Gemäß diesem entscheidet die Energieeinbringung über das (hier thermische) Beanspruchungskollektiv, das schließlich die Werkstoffmodifikation hervorruft [BRIN14]. Im Falle der Drahtfunkenerosion ist dieses Beanspruchungskollektiv interdependent sequenziell abgestuft (Haupt- und Nachschnitte) und zudem örtlich inhomogen ausgeprägt (Drahtverschleiß, spülungsbedingter lokaler Spaltzustand) [KLIN16a].

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist es, die Voraussetzungen für eine flexible, wissensbasierte Fertigungsprozessentwicklung in der Drahtfunkenerosion analytisch und anwendungsbezogen zu erarbeiten. Dazu gilt es zunächst die Prozessgrundlagen anhand von Einzelentladungen spezifisch für die Drahtfunkenerosion zu untersuchen. Analog zu fundamentalanalytischen Zusammenhangsuntersuchungen zur Prozesssignatur (vgl. SCHNEIDER 2021 und MOHAMMADNEJAD 2020 [SCHN21a, MOHA20]) wird dabei selektiv auf die Werkstückseite fokussiert. Es wird insbesondere der Versuch unternommen, unterschiedliche Entladungstypen hinsichtlich ihrer Entstehens- und Einflusssystematik einzuordnen. Im Folgenden liefert diese Arbeit eine prozesssignalbasierte Analyse aller Schnittstufen des kontinuierlichen Drahtfunkenerosionsprozesses, die, soweit möglich, die Energieübertragungsspezifika ortsaufgelöst darstellt und damit der örtlich inhomogenen Prozesscharakteristik Rechnung trägt. Die dabei entwickelten Kenngrößen zur Bewertung auftretender Prozesszustände bilden schließlich die Grundlage, unterschiedliche Prozesstechnologievarianten qualifiziert miteinander zu vergleichen sowie zu den im letzten Kapitel vorgestellten Lang- und Kurzzeitfestigkeitsanalysen in Bezug zu setzen. Die Festigkeitsanalysen der WEDM-Prozessvarianten werden jeweils einem Schleifprozess vergleichend gegenübergestellt. Darüber hinaus werden die positiven Einflussmöglichkeiten von Nachbearbeitungsverfahren auf die Langzeitfestigkeit beleuchtet.

Auf diese Weise wird das Grundlagenverständnis für eine wissensbasierte Technologieentwicklung entlang des Konzepts der Prozesssignatur ausgebaut, das speziell in der Triebwerkfertigung zur praxisrelevanten Verkürzung, Flexibilisierung und Absicherung technologischer Entwicklungsprozesse beitragen kann.

Introduction

Five years after the pandemic-induced downturn, the aviation sector has once again reached pre-crisis levels of 2019 in terms of passenger kilometers flown. Due to ongoing global economic and population growth, the worldwide civilian aircraft fleet is expected to double over the next 20 years to around 48,000 passenger and cargo aircraft. Nearly 90% of this total will need to be either newly commissioned or replaced by 2043. On the path to decarbonizing aviation, the latest engines, which will be deployed on a large scale, offer the greatest short-term leverage to further rapidly reduce specific CO₂ emissions. These engines already emit 15 to 25% less CO₂ than their predecessors [AIRB24, IATA23, AUST23].

These efficiency improvements are the result of better propulsion efficiency, achieved by increasing the bypass ratio. This increase necessitates a boost in turbine power, and consequently higher turbine inlet temperatures and pressures, to improve the thermal efficiency of the engines [BRÄU15]. Engine manufacturers are pursuing two different approaches to achieve this. First, new materials with higher temperature resistance are increasingly being used. This strategy requires significant technological investments, making it relatively time-, cost-, and risk-intensive. Second, decades of continuously improved and validated manufacturing and material data allow dynamic design limits to be further pushed, even with well-established materials like IN718. This approach enables relatively quick and cost-effective efficiency gains. As a result, the combination of growing sales and increasing material requirements for efficiency improvements makes the expansion of manufacturing flexibility at engine manufacturers urgently necessary.

In terms of this need for flexibility in engine manufacturing, the use of wire electrical discharge machining (WEDM) offers a potential that has been widely recognized but has so far been used only to a limited extent in practice. WEDM is an unconventional manufacturing process that enables material removal with almost no force using electrical discharges. It allows the production of excellent surface qualities and precise adherence to minimal dimensional tolerances, regardless of the mechanical properties of the material. Therefore, it is particularly well-suited for manufacturing the highly stressed profile grooves in turbine disks. The fundamental suitability of this process has been extensively studied and demonstrated in recent years [KLOC14b, WELL14, WELL15].

However, a particular challenge in the technological development for this application is the strength-optimizing process design. This must ensure the targeted setting of desired surface layer properties of the component's functional surfaces. In practice, development takes place in time-consuming iterative loops until the process can be specifically certified and finalized for the application.

This experience-based concept of process development is addressed by the approach of the process signature. According to this approach, the energy input determines the

(in case of EDM thermal) stress collective, which ultimately causes the material modification [BRIN14]. In the case of WEDM, this stress collective is sequentially graded (main and trim cuts) and spatially inhomogeneous (due to wire wear and local flushing conditions) [KLIN16a].

The overarching goal of this work is to analytically and application-relatedly support the path toward a more flexible, knowledge-based manufacturing process development in WEDM. To do so, the process fundamentals must first be specifically investigated for WEDM based on single discharges. According to fundamentally analytical studies on process signatures (see SCHNEIDER 2021 and MOHAMMADNEJAD 2020, [SCHN21a, MOHA20]), this work also focuses on the workpiece side. The aim is to classify different discharge types in terms of their formation and influence systematics. Following this, the work provides a process signal-based analysis of all cutting stages of the continuous WEDM process, which, as far as possible, spatially resolves the specifics of energy transfer and thus accounts for the spatially inhomogeneous nature of the process. The parameters developed for evaluating the process conditions provide the basis for qualified comparisons of different process technology variants and for relating these to the long- and short-term strength analyses presented in the final chapter. The strength analyses of WEDM process variants are compared with a grinding process. Additionally, the positive influence of post-processing methods on long-term strength is examined.

In this way, the fundamental understanding of knowledge-based technology development according to the process signature concept is expanded, which can specifically contribute to shortening, increasing flexibility, and securing technological development processes in engine manufacturing.