

1 Einleitung

„Nachhaltige, innovative Produktionstechnologien sind zentrale Schlüsselemente, um die Produktivität im Rahmen der Klimaziele zu steigern, die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu verringern und damit die Wettbewerbsfähigkeit des Technologiestandorts Deutschland langfristig zu sichern.“

Prof. Dr.-Ing. R. Neugebauer, damaliger Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft beim Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium „Empower Green Production“ im Mai 2023

Inmitten des Spannungsfelds zwischen steigenden Anforderungen an die Produktivität sowie an die Nachhaltigkeit von Fertigungsprozessen und höchster Bauteilqualität steht die spanende Bearbeitung von rotationssymmetrischen Triebwerkskomponenten wie Turbinenscheiben und Lagerringen. Die Komponenten sind im Flugbetrieb, insbesondere beim Start, höchsten thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt und werden daher aus hochwarmfesten Werkstoffen wie Nickelbasislegierungen hergestellt. Die Zerspanung dieser Werkstoffe stellt die Fertigungstechnologie vor komplexe Herausforderungen. Exzessiver Werkzeugverschleiß, stark begrenzte Zeitspanvolumina und fehlender Spanbruch führen zu Prozessunterbrechungen, eingeschränkter Prozesssicherheit und geringer Produktivität.

Zusätzlich sind produzierende Unternehmen an immer strengere Richtlinien in Bezug auf Umweltschutz und Ressourcenschonung gebunden sowie steigenden Energiepreisen und Lohnkosten ausgesetzt. Die Zerspanprozesse sind gemäß diesen Anforderungen zu optimieren, ohne Einbußen bezüglich der Bauteilqualität zuzulassen.

Da es sich bei Komponenten des Triebwerks um sicherheitskritische Bauteile handelt, müssen besondere Qualitätsanforderungen insbesondere an die Werkstückoberfläche und die Randzone erfüllt werden. Fertigungsbedingte Anomalien können die Lebensdauer der Komponenten verkürzen und somit, wenn sie nicht festgestellt werden, ein Versagen von Triebwerken im Flugbetrieb bedingen. Grundsätzlich führen fertigungsbedingte Oberflächenanomalien zu kostenintensiven Einzelfallentscheidungen, Nachbearbeitung oder Ausschuss der betroffenen Bauteile.

Angepasste Kühlschmierstrategien bieten Lösungen für die Herausforderungen bei der Bearbeitung von Nickelbasislegierungen. Durch eine gerichtete Hochdruck-Kühlschmierstoffzufuhr (HD-KSS-Zufuhr) wird die Zerspanzone besser gekühlt und geschmiert als bei der verbreiteten konventionellen Überflutungskühlung (KÜK). Der Werkzeugverschleiß wird verringert und es werden kurzbrüchige Späne im Drehprozess erzielt. Gegenüber der KÜK wurden in verschiedenen Fallstudien am Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen University bei geeigneten Zerspanbedingungen verdoppelte Zeitspanvolumina ohne Verminderung der Werkzeugstandgrößen erzielt. Trotz des Betriebs des zusätzlichen KSS-Hochdruckaggregats konnte die erforderliche elektrische Energie pro zerspannte Volumeneinheit um etwa ein Drittel reduziert werden. [SANG13; KLOC15]

Die HD-KSS-Zufuhr gewinnt aufgrund der beschriebenen Potenziale zunehmend an Bedeutung. Bei der Schlichtbearbeitung muss auf den Einsatz der HD-KSS-Zufuhr bislang jedoch weitestgehend verzichtet werden. Die durch den dauerhaft auf die

Zerspanzone gerichteten KSS-Strahl kurz gebrochenen Späne werden durch diesen beschleunigt und können mit hoher Geschwindigkeit auf bereits geschlichtete Werkstückoberflächen auftreffen. Forschungsarbeiten am Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen University zeigten, dass Teile des Spans auf der Werkstückoberfläche anhaften und durch den Aufprall sogar Werkstoff aus der Oberfläche herausgetrennt werden kann. [SANG13; CAYL17; SPLE21]

Eine gezielte Einstellung der Spanlänge, sodass der Aufprall verhindert oder die Energie des Aufpralls durch die elastische und plastische Verformung des Spans aufgenommen wird, soll Schädigungen der Werkstückoberfläche vermeiden. Ein Lösungsansatz ist eine bisher industriell nicht angewendete pulsierende KSS-Zufuhr (P-KSS-Zufuhr). Die P-KSS-Zufuhr basiert auf zwei wechselnden Zeitintervallen mit alternierenden KSS-Zufuhrdrücken. Im Zeitintervall mit reduziertem Zufuhrdruck „RD“ reicht die Kraft des KSS-Strahls nicht aus, um den sich formenden Span zu brechen. Die Zerspanzone wird jedoch weiterhin gezielt gekühlt und geschmiert. Mit Einsetzen des Hochdruck-Intervalls „HD“ wird ein kurzer Hochdruckpuls zum Brechen des Spans erzeugt. Neben der Vermeidung von Oberflächenanomalien soll durch diese Technologie der Bedarf an umweltschädlichen Kühlschmierstoffen und an Energie zum Betrieb von Hochdruckaggregaten gesenkt werden. [CAYL17; SPLE21]

Bisher liegen zur Anwendung der P-KSS-Zufuhr nur wenige Erkenntnisse vor. Insbesondere im Hinblick auf die Ursache-Wirkungszusammenhänge zwischen den Bedingungen des Zerspanprozesses und der P-KSS-Zufuhr und der Spanbildung sowie der Oberflächenqualität bestehen umfangreiche Wissenslücken.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen wesentlichen Beitrag zur Erklärung der Zusammenhänge der P-KSS-Zufuhr beim Schlichtdrehen von Inconel 718 zu leisten. Dieser Beitrag bietet die Grundlage für eine wissensbasierte, technologisch, ökonomisch und ökologisch sinnvolle Prozessauslegung und langfristig: die industrielle Nutzung der Technologie.

Introduction

Sustainable, innovative production technologies are key elements in increasing productivity in line with climate targets, reducing dependence on fossil fuels and thus securing the long-term competitiveness of Germany as a technology location.

According to Prof. Dr.-Ing. R. Neugebauer, former President of the Fraunhofer-Gesellschaft at the Aachen Machine Tool Colloquium “Empower Green Production” in May 2023

The machining of rotationally symmetric engine components, such as turbine discs and bearing rings, is a key area where the increasing demands for productivity and sustainability of manufacturing processes, as well as the need for highest component quality, come into conflict. These components are subjected to extreme thermal and mechanical loads during flight, particularly during take-off, and are therefore manufactured from high-temperature materials such as nickel-based superalloys. There are complex manufacturing challenges in machining these materials. Excessive tool wear, severely limited material removal rates and lack of chip breakage can lead to process interruptions, limited process reliability and low productivity.

Manufacturers are facing increasingly stringent environmental and resource protection regulations, as well as rising energy prices and labour costs. To meet these requirements without compromising component quality, machining processes must be optimized.

Because engine components are safety-critical parts, special quality requirements must be met, particularly with regard to the workpiece surface and rim zone. Production-related anomalies can reduce component lifespan and, if undetected, cause engine failure during flight. Production-related surface anomalies generally result in costly individual decisions to either rework or reject the affected components.

Adapted cutting fluid (CF) supply strategies offer solutions to the challenges of machining nickel-based alloys. A targeted high-pressure (HP) cutting fluid supply enables an improved cooling and lubrication of the cutting zone compared to conventional flood cooling. Tool wear is reduced and chip breakage is achieved during the turning process. In various case studies at the Machine Tool Laboratory of RWTH Aachen University, chip removal rates were doubled compared to flood cooling under similar cutting conditions without reducing tool life. Despite operating an additional high-pressure unit, the electrical energy required per volume machined was reduced by about one third. [SANG13; KLOC15].

HP CF supply is becoming increasingly important due to these benefits. However, the use of HP CF supply has largely been neglected in finishing operations. The chips, which are broken by the fluid jet directed permanently at the cutting zone, are accelerated by the jet and can hit the already finished workpiece surfaces at high speed. Research at the Machine Tool Laboratory of RWTH Aachen University has shown that parts of the chips adhere to the workpiece surface and the impact can even cause material to separate from the surface. [SANG13; CAYL17; SPLE21].

A targeted adjustment of the chip length so that the impact is either prevented or the energy of the impact is absorbed by the elastic and plastic deformation of the chip should prevent damage to the workpiece surface. One approach is pulsating CF supply (P CF supply), which has not yet been used industrially. The P CF supply is based on two time intervals with alternating coolant supply pressures. During the reduced pressure period, the force of the coolant jet is not sufficient to break the forming chip. However, the cutting zone is still cooled and lubricated. When the high-pressure interval starts, a short high-pressure pulse is generated to break the chip. In addition to avoiding surface anomalies, this technology is designed to reduce the need for environmentally harmful CF and the energy required to operate high-pressure units. [CAYL17; SPLE21]

To date, there has been limited understanding of the application of P CF supply. In particular, significant gaps remain in the knowledge of the cause-and-effect relationships between machining process conditions and P CF supply and chip formation and surface quality.

The aim of this work is therefore to generate significant contributions to the understanding of the relationships in P CF supply for finish turning of Inconel 718. This contribution will provide the basis for knowledge based, technologically, economically and ecologically sound process design and, in the long term, the industrial application of the technology.