

AM SURF



**Potenciál optimalizace povrchu 3D tištěných
kovových komponent**

**Potenziale der Oberflächenoptimierung bei
additiv gefertigten metallischen Bauteilen**

20. 5. 2026, Cham

Projekt:

Projekt AM SURF se zaměřuje na rozvoj a posilování výzkumných a inovačních kapacit projektového regionu tím, že propojuje aplikovaný výzkum tří výzkumných organizací (COMTES FHT, OTH Amberg-Weiden, THD – Technologický kampus Cham) a přímý transfer znalostí prostřednictvím sítě spolupracujících firem Klastru MECHATRONIKA. V rámci tohoto projektu se výzkumné organizace zaměřuje na technologie 3D tisku k optimalizaci kvality povrchu 3D tištěných kovových komponent, což je důležité téma pro firmy z mnoha oborů zastoupených v tomto regionu (automotive, medicína, aerospace). Hlavní přidanou hodnotou projektu aplikovaného výzkumu budou networkingové aktivity Klastru, který má se síťovacími aktivitami dlouholeté zkušenosti. Klastř využije svůj ověřený koncept akcí a zrealizuje česko-bavorská odborná fóra a workshopy. Intenzivním kontaktem s firmami v programovém území projektu bude zajištěn transfer znalostí a výstupů projektu.

Efektivní využití synergií kompetencí jednotlivých partnerů mezi regiony umožní rozšířit místní kapacity a kompetence malých a středních podniků v česko-bavorském regionu, které budou profitovat z jednotlivých výstupů projektu s pozitivním vlivem na posílení konkurenceschopnosti firem v pohraničí.

Každý z partnerů je jedinečný a přináší do projektu své kompetence, a právě tak dosahuje projekt svých výsledků.

Das Projekt AM SURF zielt darauf ab, die Forschungs- und Innovationskapazitäten der Projektregion zu entwickeln und zu stärken, indem es die angewandte Forschung von drei Forschungseinrichtungen (COMTES FHT, OTH Amberg-Weiden, THD - Cham Technologie Campus) und den direkten Wissenstransfer durch das Netzwerk der kooperierenden Unternehmen des Klasters MECHATRONIKA miteinander verbindet. Im Rahmen des Projekts konzentrieren sich die Forschungseinrichtungen auf 3D-Drucktechnologien zur Optimierung der Oberflächenqualität von 3D-gedruckten Metallkomponenten, ein wichtiges Thema für Unternehmen aus vielen in der Region vertretenen Branchen (Automobil, Medizin, Luft- und Raumfahrt). Der Hauptmehrwert des angewandten Forschungsprojekts wird in den Vernetzungsaktivitäten des Klasters liegen, der über eine langjährige Erfahrung mit solchen verfügt. Der Klastř wird sein bewährtes Veranstaltungskonzept nutzen und CZ - BY Fachforen und Workshops durchführen. Intensive Kontakte zu Unternehmen im Programmgebiet des Projekts werden den Transfer von Wissen und Projektergebnissen sicherstellen.

Die effektive Nutzung von Synergien der Kompetenzen der einzelnen Partner zwischen den Regionen ermöglicht, die lokalen Kapazitäten und Kompetenzen der KMU in der bayerisch-tschechischen Region zu erweitern, die von den einzelnen Projektergebnissen profitieren, was sich positiv auf die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen in der Grenzregion auswirkt.

Jeder Projektpartner bringt seine individuellen Kompetenzen und Erfahrungen ein und trägt damit maßgeblich zum Erfolg des Projekts bei.

Partneři

COMTES FHT a.s.



Hlavní partner pro koordinaci a experimentální program, který se zabývá výzkumem v oblasti aditivní výroby pomocí různých technologií. COMTES FHT provádí tepelné zpracování, metalografické analýzy (včetně laserové, světelné a elektronové mikroskopie), měření chemického složení (EDS), měření vnitřního pnutí nebo specifické mechanické testy na miniaturních zkušebních tělesech.

OTH Amberg-Weiden



Odborníci na rychlé prototypování, laserové zpracování a únavovou pevnost materiálů. Vybavení jejich laboratoří zahrnuje zařízení pro podrobnou metalografickou a rentgenovou analýzu vzorků a testy k posouzení vlivu laserové úpravy na korozní vlastnosti komponent. K dispozici jsou i dynamické testy, které simulují zatížení v provozu a pomáhají porovnávat výsledky s modelovými simulacemi.

TH Deggendorf, TC Cham



Technologický kampus v Chamu se zaměřuje na výzkum aditivní výroby a mechatroniky s využitím různých systémů. V projektu zajišťuje testy a analýzy s využitím metod jako selektivní laserové tavení (SLM) a nanášení řízenou energií (DED), což umožňuje zkoumat mechanické vlastnosti a mikrostrukturu materiálů pro lepší porozumění jejich průmyslovému využití.

Klaster MECHATRONIKA



Propojuje firmy a akademickou sféru v oblasti mechatroniky, aditivní výroby a výměny znalostí. Organizuje setkání, která podporují přímý kontakt mezi odborníky a firmami, a využívá dlouhodobě ověřené formáty akcí, aby efektivně šířil výstupy projektu mezi regionálními partnery.

V rámci projektu Klaster aktivně informuje o jeho aktivitách a výsledcích při různých příležitostech. Informace se tak dostanou k různým oborům a zpětná vazba pomůže výzkumníkům v projektu efektivněji fokusovat výzkumné cíle.

Die Partner

COMTES FHT a.s.



Der Hauptpartner für die Koordinierung des Forschungs- und Versuchsprogramms, das sich mit der Forschung im Bereich der additiven Fertigung unter Einsatz verschiedener Technologien befasst. COMTES FHT führt Wärmebehandlungen, metallographische Analysen (einschließlich Laser-, Licht- und Elektronenmikroskopie), Messungen der chemischen Zusammensetzung (EDS), Eigenspannungsmessungen oder spezifische mechanische Tests an Miniaturprüfkörpern durch.

OTH Amberg-Weiden



Experten für Rapid Prototyping, Laserbearbeitung und Ermüdungsfestigkeit von Werkstoffen. Die Laboreinrichtungen umfassen Geräte zur detaillierten metallografischen und röntgenologischen Analyse von Proben sowie Tests zur Bewertung der Auswirkungen der Laserbehandlung auf die Korrosionseigenschaften von Bauteilen. Außerdem stehen dynamische Tests zur Verfügung, um die Belastungen im Betrieb zu simulieren und die Ergebnisse mit Modellsimulationen zu vergleichen.

TH Deggendorf, TC Cham



Der Technologie Campus Cham konzentriert sich auf die Forschung im Bereich der additiven Fertigung und der Mechatronik mit verschiedenen Systemen. Das Projekt bietet Tests und Analysen mit Methoden wie dem selektiven Laserschmelzen (SLM) und der gerichteten Energieabscheidung (DED), mit denen die mechanischen Eigenschaften und die Mikrostruktur von Materialien für ein besseres Verständnis ihrer industriellen Anwendungen untersucht werden können.

Klastr MECHATRONIKA



Verbindet Unternehmen und Hochschulen auf dem Gebiet der Mechatronik, der additiven Fertigung und des Wissensaustauschs. Organisiert Treffen, die den direkten Kontakt zwischen Experten und Unternehmen fördern, und nutzt seit langem etablierte Veranstaltungsformate, um die Projektergebnisse effektiv an regionale Partner weiterzugeben.

Im Rahmen des Projekts informiert der Klastr bei verschiedenen Gelegenheiten aktiv über Aktivitäten und Ergebnisse. Die Informationen erreichen so verschiedene Disziplinen und das Feedback hilft den Forschernden im Projekt, ihre Forschungsziele gezielter auszurichten.

Funkční povrch a skutečný nosný průřez kovových dílů z aditivní výroby

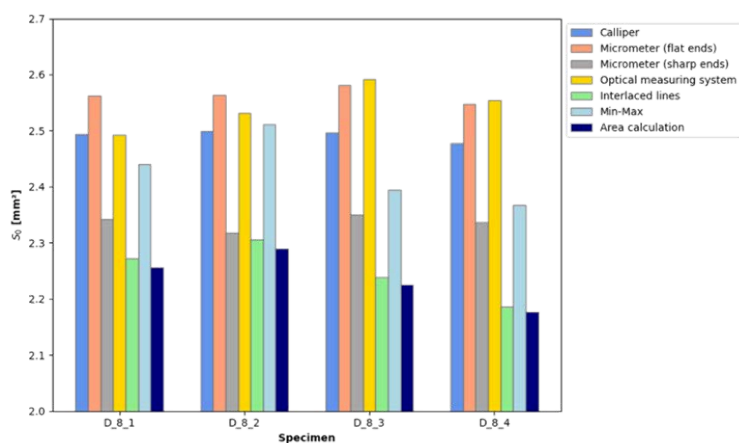
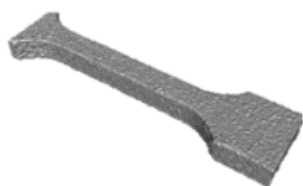
Metodika, která propojuje skutečný nosný průřez, konstrukční návrh a numerickou simulaci.

Povrch kovových dílů vyrobených procesem Laser Powder Bed Fusion (PBF-LB/P) v tzv. as-built stavu zásadně ovlivňuje mechanické vlastnosti a provozní spolehlivost. Drsnost povrchu, lokální nehomogenity a skutečný nosný průřez mohou významně snížit skutečný přenos zatížení i životnost součástí. Miniaturizované zkušební vzorky (MTT) se používají k mechanické charakterizaci materiálu v případech, kdy je k dispozici jen malé množství materiálu nebo je nutné hodnotit lokální vlastnosti dílu, typicky u aditivně vyráběných součástí v as-built stavu.

Zaměřujeme se na **charakterizaci skutečného nosného průřezu a povrchové kvality vzorků** pomocí komplexního mapování topografie povrchu, které lépe popisuje funkční chování dílů než jen samotná hodnota drsnosti R_a . Důraz je kladen na identifikaci povrchových oblastí podílejících se na přenosu zatížení a na jejich vztah k výrobním parametrům.

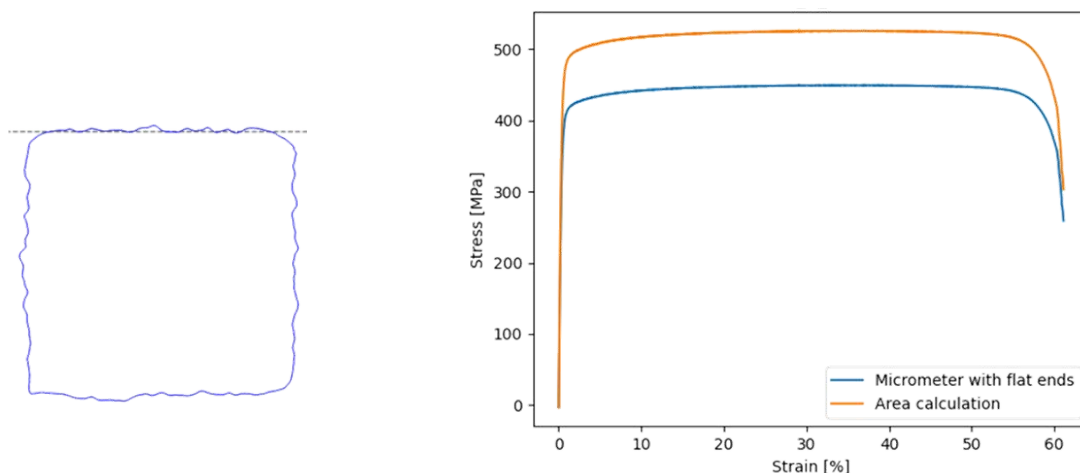
Součástí přístupu je také **cílená modifikace povrchu již v as-built stavu**, a to prostřednictvím optimalizace výrobního procesu nebo lokálních povrchových úprav. Cílem je zvýšení podílu nosné plochy, zlepšení funkčních vlastností povrchu a snížení potřeby náročných post-procesních operací.

Výsledkem je lepší predikovatelnost chování dílů, vyšší mechanické charakteristiky a efektivnější průmyslové využití kovové aditivní výroby.



Miniaturizované těleso pro zkoušku tahem vyrobené PBF-LB/P a srovnání určení skutečného nosného průřezu různými metodami měření.

Srovnání výsledků miniaturizované tahové zkoušky ukazuje, že rozdílné způsoby určení skutečného nosného průřezu vzorku s as-built povrchem vedou k významně odlišným napěťově-deformačním křivkám a podhodnocení pevnostních charakteristik téměř o 20 % z hlediska meze kluzu a meze pevnosti v tahu. Konvenční metody měření obvykle vedou k nižším hodnotám pevnostních charakteristik.



Vliv způsobu určení nosné plochy as-built vzorku na výsledky miniaturizované tahové zkoušky

Praktické přínosy pro průmysl

- Opora pro konstruktéry – metodika poskytuje reálná data o skutečném nosném průřezu a funkčním povrchu, která umožňují navrhovat díly podle skutečného přenosu zatížení
- Kalibrace materiálových modelů – kvantifikace skutečného průřezu slouží jako vstup pro přesnější tvorbu a kalibraci materiálových karet pro výpočetní softwary založených na metodě konečných prvků
- Spolehlivější simulace, méně prototypů – propojení měření povrchu s numerickými modely vede k vyšší predikční schopnosti simulací a nižším nákladům na vývoj

Funktionsoberflächen und der tatsächliche tragende Querschnitt additiv gefertigter Metallbauteile

Entwicklung einer Methodik zur Verknüpfung des realen tragenden Querschnitts, der Konstruktion und der numerischen Simulation.

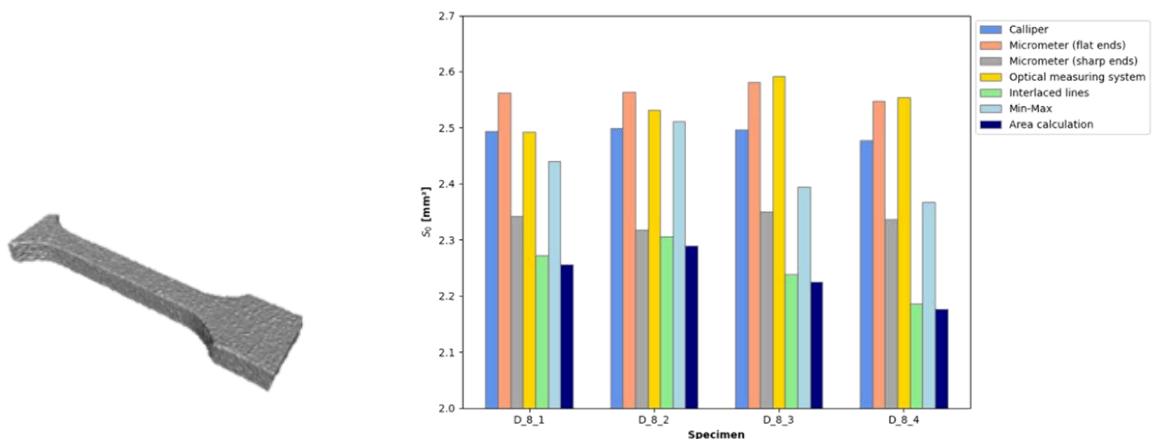
Die Oberfläche von Metallbauteilen, die im Laser-Pulverbett-Fusionsverfahren (PBF-LB/P) hergestellt werden, hat im sogenannten „As-built“-Zustand einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und die Betriebssicherheit. Oberflächenrauheit, lokale Inhomogenitäten sowie der tatsächliche tragende Querschnitt können die reale Lastübertragung und die Lebensdauer der Bauteile erheblich beeinträchtigen.

Miniaturisierte Testproben (MTT) werden zur mechanischen Charakterisierung von Materialien eingesetzt, insbesondere wenn nur geringe Materialmengen zur Verfügung stehen oder lokale Eigenschaften eines Bauteils bewertet werden müssen – ein typischer Anwendungsfall bei additiv gefertigten Bauteilen im „As-built“-Zustand.

Im Fokus unserer Forschung steht die Charakterisierung des tatsächlichen tragenden Querschnitts sowie der Oberflächenqualität der Proben mithilfe einer umfassenden Kartierung der Oberflächentopografie. Diese ermöglicht eine deutlich präzisere Beschreibung des funktionalen Verhaltens der Bauteile als der alleinige Ra-Rauheitswert. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Identifizierung jener Oberflächenbereiche, die an der Lastübertragung beteiligt sind, sowie auf der Analyse ihres Zusammenhangs mit den Fertigungsparametern.

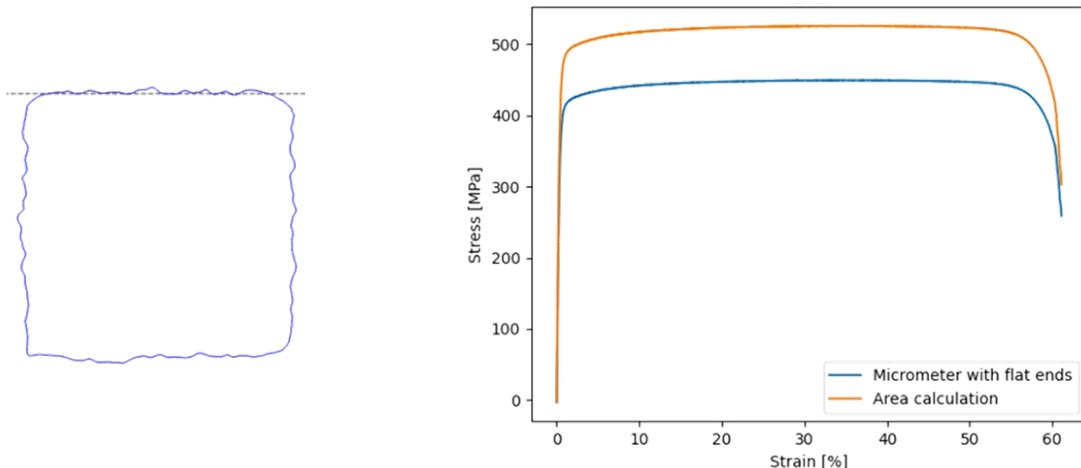
Ein weiterer Bestandteil des Prozesses ist die gezielte Modifizierung der Oberfläche bereits im „As-built“-Zustand – entweder durch die Optimierung des Fertigungsprozesses oder durch lokale Oberflächenbehandlungen. Ziel ist es, den Anteil der tragenden Fläche zu erhöhen, die funktionalen Eigenschaften der Oberfläche zu verbessern und den Bedarf an aufwendigen Nachbearbeitungsschritten zu reduzieren.

Das Ergebnis ist eine bessere Vorhersagbarkeit des Bauteilverhaltens, verbesserte mechanische Eigenschaften sowie eine effizientere industrielle Nutzung der additiven Metallfertigung



Miniaturisierter Zugprüfkörper, hergestellt mittels PBF LB/P, und Vergleich der Bestimmung des tatsächlichen tragenden Querschnitts mit verschiedenen Messmethoden.

Ein Vergleich der Ergebnisse miniaturisierter Zugversuche zeigt, dass unterschiedliche Methoden zur Bestimmung des tatsächlichen tragenden Querschnitts von Proben mit „As-built“-Oberfläche zu deutlich abweichenden Spannungs-Dehnungs-Kurven führen. Zudem können die Festigkeitseigenschaften – insbesondere Streckgrenze und Zugfestigkeit – um nahezu 20 % unterschätzt werden. Herkömmliche Messmethoden führen dabei in der Regel zu niedrigeren Werten der Festigkeitseigenschaften.



Einfluss der Bestimmung von der Tragfläche der „as-built-Probe“ auf die Ergebnisse des miniaturisierten Zugversuchs

Praktischer Nutzen für die Industrie

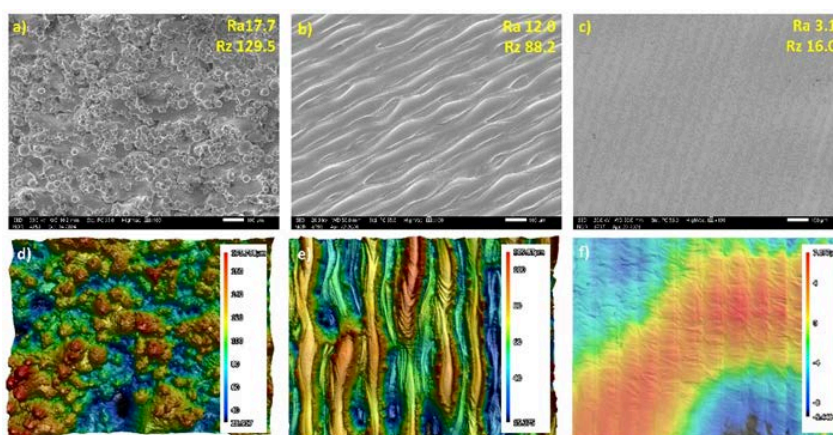
- **Unterstützung für Konstrukteure** – die Methodik liefert reale Daten zum tatsächlichen tragenden Querschnitt und zur funktionalen Oberfläche und ermöglicht dadurch eine bauteilgerecht ausgelegte Konstruktion auf Basis der realen Lastübertragung
- **Kalibrierung von Materialmodellen** – die Quantifizierung des tatsächlichen Querschnitts dient als Eingabe für eine genauere Erstellung und Kalibrierung von Materialdatenblättern für Berechnungssoftware auf Basis der Finite-Elemente-Methode
- **Zuverlässigere Simulationen, weniger Prototypen** – die Verknüpfung von Oberflächenmessungen mit numerischen Modellen führt zu einer höheren Vorhersagekraft der Simulationen und geringeren Entwicklungskosten

Integrita povrchu v aditivní výrobě kovových dílů

U kovových dílů vyrobených procesem Laser Powder Bed Fusion (PBF-LB/P) představuje leštění laserem účinný nástroj pro zlepšení integrity povrchu na přístupných vnějších plochách dílů. Metoda je založena na lokálním přetavení tenké povrchové vrstvy materiálu, což vede k výraznému snížení drsnosti a homogenizaci povrchu bez mechanického kontaktu.

Proces vyžaduje ochrannou atmosféru (typicky inertní plyn) pro zabránění oxidace povrchu během přetavení. Vzhledem k přímé viditelnosti laserového svazku je však použití omezeno na otevřené povrchy a není vhodné pro vnitřní dutiny a úzké otvory.

Laserové leštění je proto vhodným doplňkem ostatních post-procesních metod v případech, kde je požadována lokální, přesná a bezkontaktní úprava povrchu. Cílem je dosažení funkční kvality povrchu $Ra \leq 3,2 \mu\text{m}$, v optimalizovaných případech až $Ra \leq 1,6 \mu\text{m}$. Klíčovým faktorem úspěchu je správná volba parametrů laseru a ochranné atmosféry, která zásadně ovlivňuje účinnost procesu



Povrchové morfologie ve stavu as-built (a, d), při optimalizaci parametrů laserového leštění (b, e) a při optimálním nastavení parametrů laseru zahrnujícím laserové leštění kombinované s čištěním (c, f), dokumentované pomocí SEM (a–c) a konfokálního laserového mikroskopu (d–f).

Laserové leštění jako nástroj funkční optimalizace povrchu

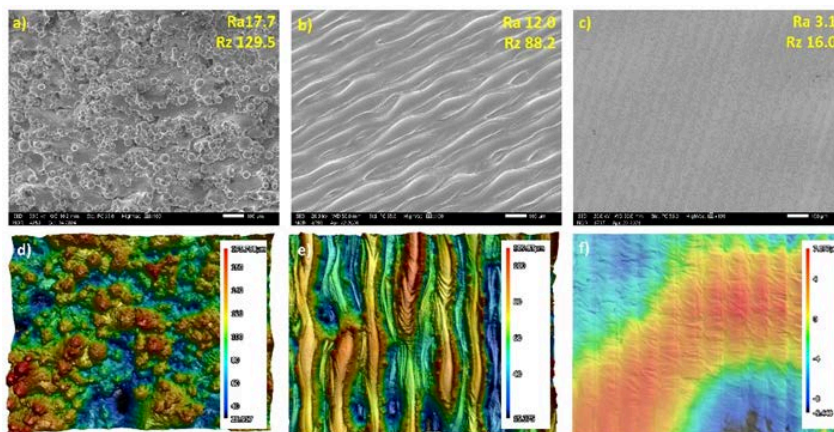
- Laserové leštění lze efektivně kombinovat s procesem PBF-LB/P jako navazující krok řízené optimalizace povrchu.
- **Zvýšení funkčnosti a životnosti dílů** – výrazné snížení drsnosti a homogenizace povrchové vrstvy zlepšují únavové, tribologické i korozní vlastnosti součástí.
- **Bezkontaktní a přesná lokální úprava povrchu** – možnost cíleného zpracování vybraných vnějších ploch bez ovlivnění geometrie dílu a bez mechanického namáhání.
- **Snížení potřeby náročného post-processingu** – omezení mechanického dokončování a ručních operací vede ke zkrácení výrobních časů a snížení nákladů.
- **Vyšší predikovatelnost chování dílů v provozu** – kontrolovaná integrita povrchu poskytuje spolehlivější vstupy pro konstrukční návrh i numerické simulace.

Oberflächenintegrität bei der additiven Fertigung von Metallbauteilen

Bei Metallbauteilen, die im Laser-Pulverbett-Fusionsverfahren (PBF-LB/P) hergestellt werden, stellt das Laserpolieren ein wirksames Mittel zur Verbesserung der Oberflächenintegrität an den zugänglichen Außenflächen dar. Das Verfahren basiert auf dem lokalen Umschmelzen einer dünnen Oberflächenschicht des Materials, was zu einer deutlichen Verringerung der Rauheit und einer Homogenisierung der Oberfläche ohne mechanischen Kontakt führt.

Dieser Prozess erfordert eine Schutzatmosphäre (in der Regel Inertgas), um eine Oxidation der Oberfläche während des Umschmelzens zu verhindern. Aufgrund der direkten Sichtbarkeit des Laserstrahls ist der Einsatz jedoch auf offene Oberflächen beschränkt und für Innenhohlräume und enge Öffnungen ungeeignet.

Das Laserpolieren stellt daher eine geeignete Ergänzung zu anderen Nachbearbeitungsmethoden dar, in denen eine lokale, präzise und berührungslose Oberflächenbearbeitung erforderlich ist. Ziel ist es, eine funktionale Oberflächenqualität von $R_a \leq 3,2 \mu\text{m}$ zu erreichen, in Optimalfällen sogar bis zu $R_a \leq 1,6 \mu\text{m}$. Ein entscheidender Erfolgsfaktor ist die richtige Wahl der Laserparameter und der Schutzatmosphäre, die die Effizienz des Prozesses maßgeblich beeinflussen.



Oberflächenmorphologien im Ist-Zustand (a, d), bei optimierten Parametern für das Laserpolieren (b, e) und bei optimaler Einstellung der Laserparameter, einschließlich Laserpolieren in Kombination mit Reinigung (c, f), dokumentiert mittels Rasterelektronenmikroskopie (a–c) und konfokalem Lasermikroskop (d–f).

Laserpolieren als Verfahren zur funktionalen Oberflächenoptimierung

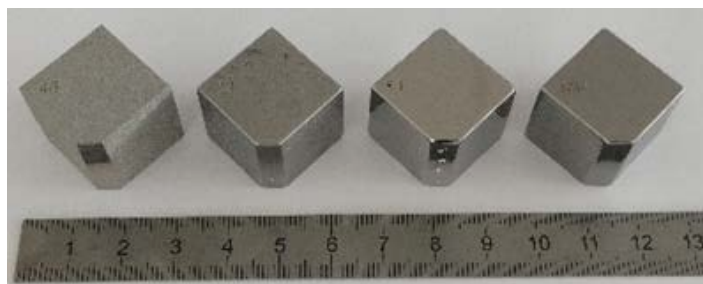
- Das Laserpolieren lässt sich effektiv mit dem PBF-LB/P-Verfahren als nachfolgender Schritt zur gezielten Oberflächenoptimierung kombinieren.
- **Erhöhung der Funktionalität und Lebensdauer der Metallbauteile** – eine deutliche Verringerung der Rauheit und die Homogenisierung der Oberflächenschicht verbessern die Ermüdungs-, Tribologie- und Korrosionseigenschaften der Bauteile.
- **Berührungslose und präzise lokale Oberflächenbearbeitung** – Möglichkeit der gezielten Bearbeitung ausgewählter Außenflächen ohne Beeinträchtigung der Bauteilgeometrie und ohne mechanische Beanspruchung.
- **Reduzierung des Aufwands für aufwendige Nachbearbeitung** – die Einschränkung mechanischer Endbearbeitung und manueller Arbeitsschritte führt zu kürzeren Fertigungszeiten und geringeren Kosten.
- **Höhere Vorhersagbarkeit des Verhaltens der Teile im Betrieb** – die kontrollierte Oberflächenintegrität liefert zuverlässigere Eingangsdaten für die Konstruktion und numerische Simulationen.

Mechanické a elektrochemické leštění povrchu v aditivní výrobě kovů

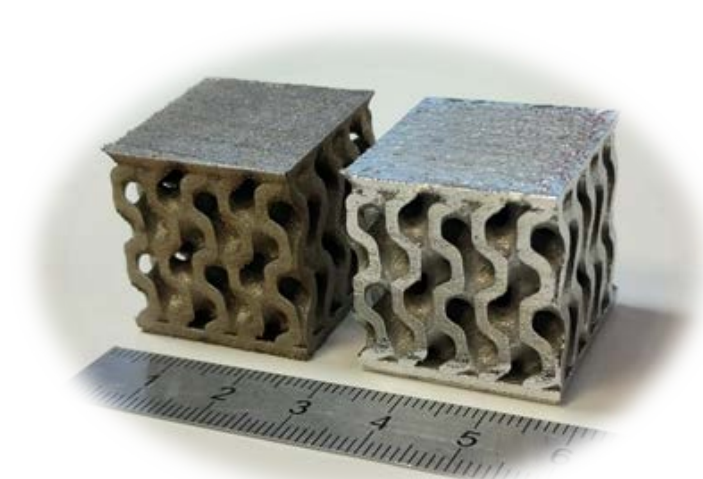
Kvalita povrchu kovových dílů vyrobených aditivními technologiemi je klíčová pro jejich funkci, životnost i ekonomiku výroby. Zaměřujeme se na efektivní kombinaci mechanického omílání a elektrochemického leštění jako nástroje pro dosažení řízené a reprodukovatelné kvality povrchu.

Studované díly z nerezové oceli 316L, vyrobené procesem Laser Powder Bed Fusion (PBF-LB/P), procházejí nejprve mechanickým omíláním pro snížení hrubé drsnosti a vyrovnaní povrchové topografie. Následné elektrochemické leštění zajišťuje homogenní vyhlazení povrchu, vysoký lesk a efektivní úpravu i složitých geometrií.

Cílem je dosažení funkční kvality povrchu $Ra \leq 3,2 \mu\text{m}$, v optimalizovaných případech až $Ra \leq 1,6 \mu\text{m}$. Klíčovým faktorem úspěchu je správná volba brusných a leštících médií, která zásadně ovlivňuje účinnost procesu, jeho délku i celkové náklady.



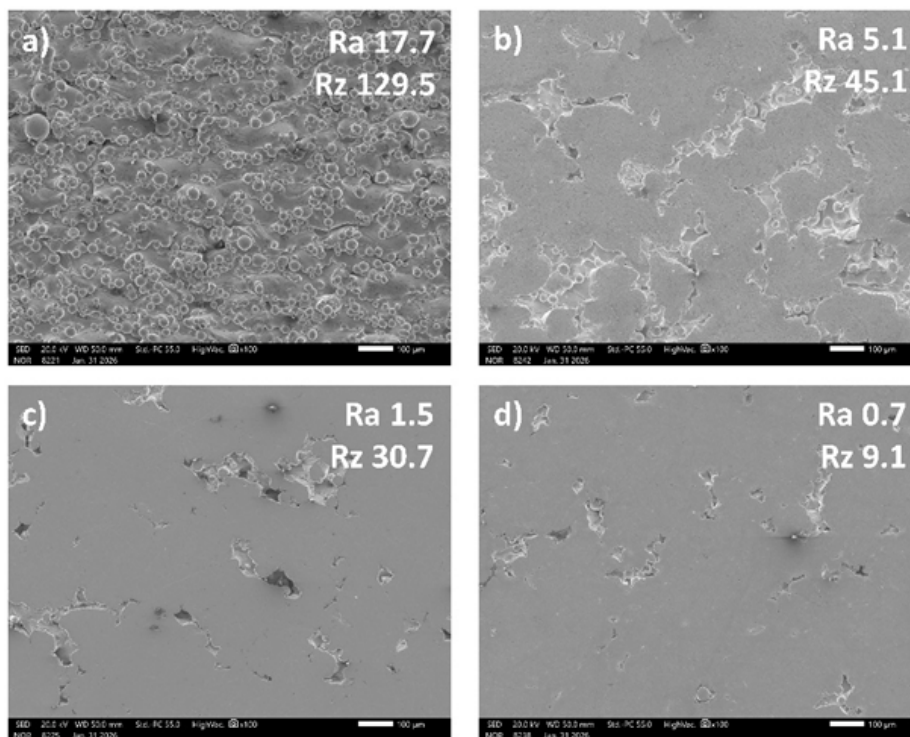
Vliv povrchové úpravy na vzhled materiálu 316L



Mechanické a elektrochemické leštění je zvláště vhodné pro složité geometrie, včetně lattice struktur a gyroidů, kde konvenční metody narážejí na omezenou přístupnost povrchu

Vývoj topografie a drsnosti povrchu oceli 316L

- a) As-built stav – povrch po procesu PBF-LB/P s vysokou drsností a výraznou topografií;
- b) Mechanické leštění pomocí keramických elementů – 2 hodiny;
- c) Mechanické leštění, kombinace keramických a plastových médií – 7 hodin;
- d) Kombinace mechanického a elektrochemického leštění.



Úloha povrchu v konstrukčním návrhu dílů

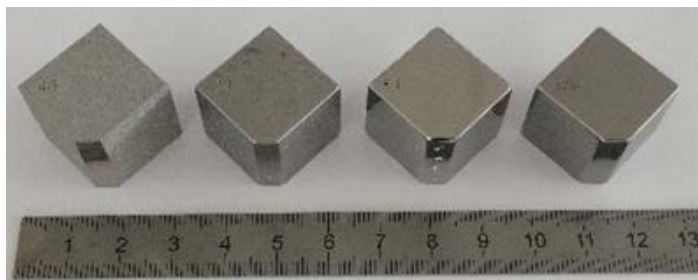
- Zrychlíme zavádění kovové aditivní výroby do vašich aplikací díky řízené a předvídatelné kvalitě povrchu.
- Snížíme náklady na dokončovací operace propojením optimalizovaného tisku s cílenými povrchovými úpravami.
- Pomáháme firmám přeměnit kvalitní povrch na měřitelnou konkurenční výhodu – vyšší výkon dílů, delší životnost a efektivnější výroba.
- Odborná volba vhodné technologie povrchových úprav podle konkrétní aplikace.

Mechanisches und elektrochemisches Oberflächenpolieren in der additiven Metallfertigung

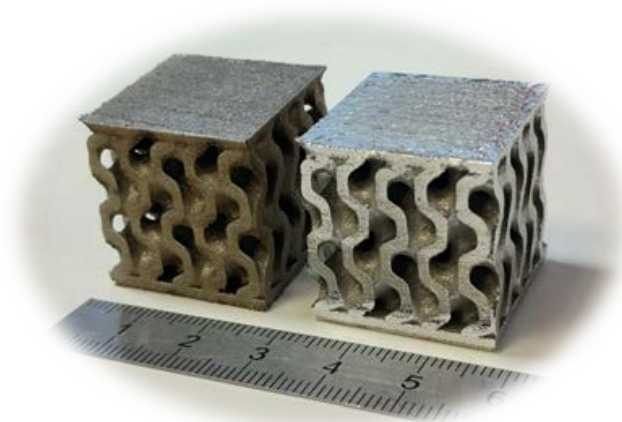
Die Oberflächenqualität von Metallteilen, die mittels additiver Fertigungstechnologien hergestellt werden, ist entscheidend für ihre Funktion, Lebensdauer und die Wirtschaftlichkeit der Produktion. Im Fokus unserer Forschung steht die effektive Kombination aus mechanischem Trommeln und elektrochemischem Polieren zur Erzielung einer kontrollierten und reproduzierbaren Oberflächenqualität.

Die untersuchten Teile aus Edelstahl 316L, die im Laser Powder Bed Fusion-Verfahren (PBF LB/P) hergestellt wurden, durchlaufen zunächst eine mechanische Trommelbearbeitung, um die Grobheit zu reduzieren und die Oberflächentopografie auszugleichen. Das anschließende elektrochemische Polieren ermöglicht eine homogene Glättung der Oberfläche, einen hohen Glanzgrad sowie eine effektive Bearbeitung auch komplexer Geometrien.

Ziel ist es, eine funktionale Oberflächenqualität von $Ra \leq 3,2 \mu m$ zu erreichen, in optimierten Fällen sogar bis zu $Ra \leq 1,6 \mu m$. Ein entscheidender Erfolgsfaktor ist die richtige Auswahl der Schleif- und Poliermedien, die die Effizienz des Prozesses, seine Dauer und die Gesamtkosten maßgeblich beeinflusst.



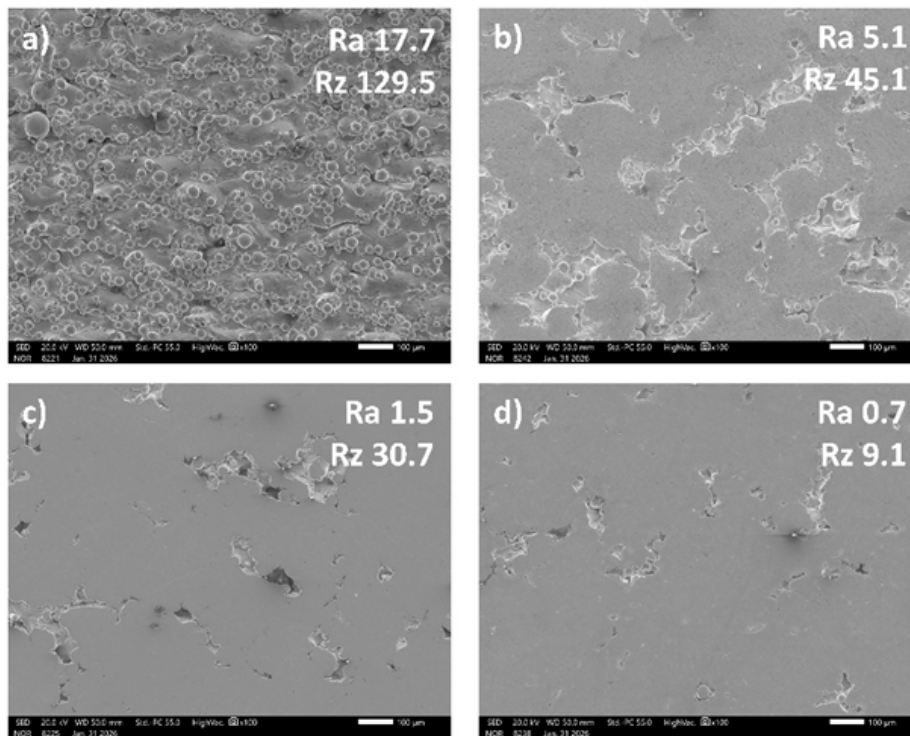
Einfluss der Oberflächenbehandlung auf das Erscheinungsbild von 316L Bauteilen



Mechanisches und elektrochemisches Polieren eignet sich besonders für komplexe Geometrien, einschließlich Gitterstrukturen und Gyroiden, bei denen herkömmliche Methoden an die begrenzte Zugänglichkeit der Oberfläche stoßen.

Entwicklung der Topografie und Oberflächenrauheit von Edelstahl 316L

- a) As-built-Zustand – Oberfläche nach dem PBF-LB/P-Verfahren mit hoher Rauheit und ausgeprägter Topografie;
- b) Mechanisches Polieren mit Keramikelementen – 2 Stunden;
- c) Mechanisches Polieren, Kombination aus Keramik- und Kunststoffmedien – 7 Stunden;
- d) Kombination aus mechanischem und elektrochemischem Polieren.



Die Rolle der Oberflächen bei der Bauteilkonstruktion

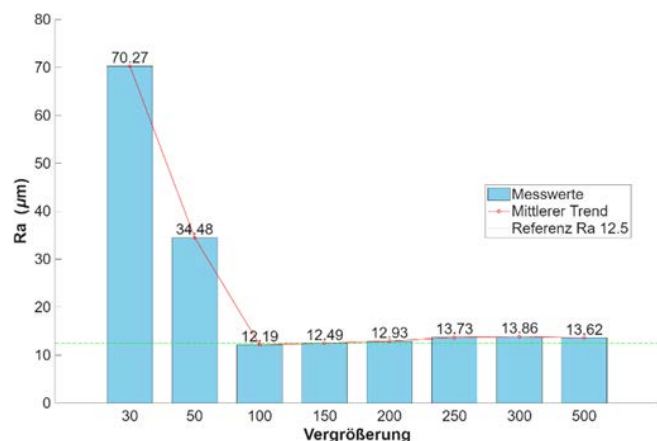
- Beschleunigung der Einführung der additiven Metallfertigung in den Betrieben dank einer kontrollierten und vorhersehbaren Oberflächenqualität.
- Reduzierung der Kosten für Nachbearbeitungsschritte, durch den optimierten Druck und mit gezielten Oberflächenbehandlungen kombinieren.
- Hilfe für Unternehmen, eine hochwertige Oberfläche in einen messbaren Wettbewerbsvorteil umzuwandeln – höhere Leistungsfähigkeit der Bauteile, längere Lebensdauer und effizientere Fertigung.
- Professionelle Auswahl der geeigneten Oberflächenbehandlungstechnologie entsprechend der konkreten Anwendung.

Projektergebnisse von THD - TC Cham

Die etablierte Messung der Oberflächenrauheit mittels Tasterprofilometrie stößt bei der Beurteilung der Oberflächenqualität kleiner, additiv gefertigter Metallteile allmählich an ihre Grenzen. Aus diesem Grund gewann der Einsatz anderer Methoden, wie beispielsweise der bildbasierten 3D-Oberflächenrekonstruktion, an Bedeutung. Bei der Fokusvariations-Digitalmikroskopie ist die Verwendung der richtigen Vergrößerungslinse und der richtigen Grenzwerte entscheidend, um korrekte Messergebnisse zu erzielen. Derzeit gibt es keine spezifische Norm für diese Methode, und auch in der wissenschaftlichen Fachwelt besteht kein Konsens über die richtigen Einstellungen. Im Rahmen dieses Projekts wurden eine systematische Untersuchung und eine MSA-Typ-I-Analyse durchgeführt, um die optimalen Einstellparameter für ein digitales Mikroskop von Keyence zu ermitteln. Wie aus dem Oberflächenrauheitsdiagramm ersichtlich ist, führt eine geringere Vergrößerungsleistung zu fehlerhaften Messungen. Darüber hinaus beeinflussen die Grenzwerte je nach Oberflächenrauheitsmetrik die Endergebnisse.

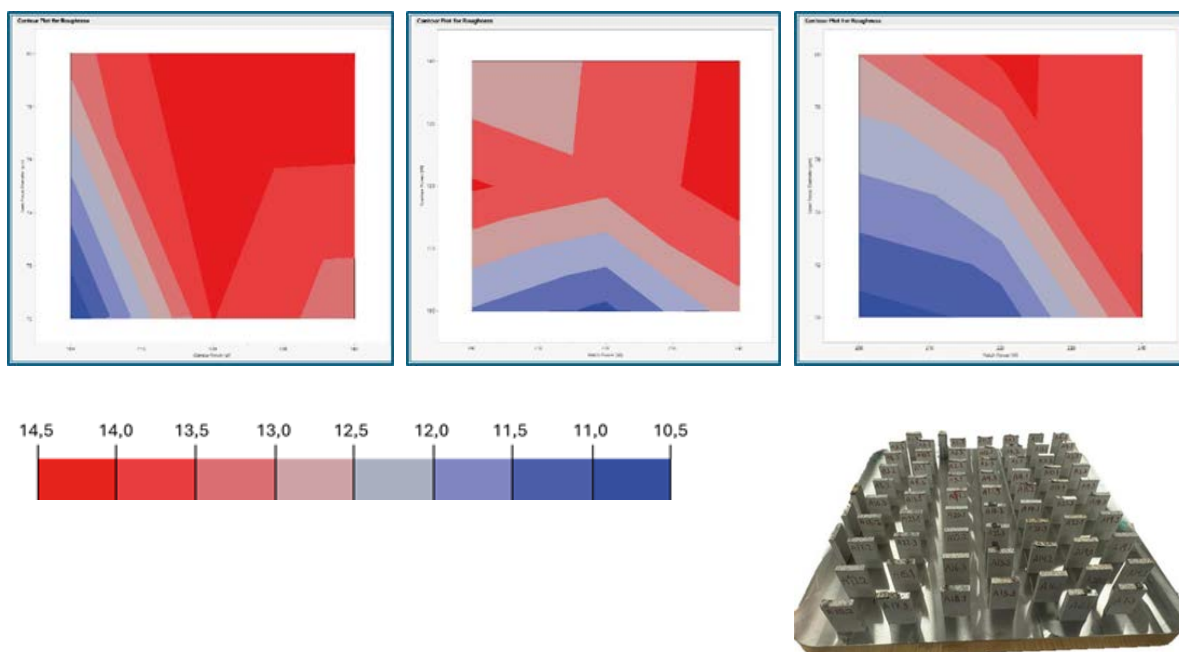
Výsledky projektových aktivit THD - TC Cham

Zavedené měření drsnosti povrchu pomocí profilometrie s hmatovým čidlem naráží při posuzování kvality povrchu malých kovových dílů vyrobených aditivní technologií postupně na své limity. Z tohoto důvodu nabývá na významu využití jiných metod, jako je například obrazová 3D rekonstrukce povrchu. U digitální mikroskopie s variací zaostření je pro dosažení správných výsledků měření rozhodující použití správné zvětšovací čočky a správných mezních hodnot. V současné době neexistuje žádná specifická norma pro tuto metodu a ani ve vědecké komunitě neexistuje shoda ohledně správných nastavení. V rámci tohoto projektu byla provedena systematická studie a analýza MSA typu I s cílem určit optimální parametry nastavení pro digitální mikroskop společnosti Keyence. Jak je patrné z grafu drsnosti povrchu, nižší zvětšení vede k chybným měřením. Kromě toho mezní hodnoty ovlivňují konečné výsledky v závislosti na metrice drsnosti povrchu.



Die hohe Variabilität der Druckparameter beim laserbasierten Metallschmelzverfahren kann zu Bauteilen führen, die den Konstruktionsanforderungen für eine bestimmte Anwendung nicht genügen. Zudem fügt die Materialauswahl einen weiteren Gestaltungsfreiheitsgrad hinzu. Zu den Qualitätsproblemen zählen innere Porosität und damit eine geringere relative Dichte, mangelnde Verschmelzung sowie eine schlechte Oberflächenqualität. Obwohl mehrere Studien versucht haben, die Druckparameter im SLM zu optimieren, hängt die Auswahl der richtigen Einstellungen nach wie vor stark von der Geometrie des Bauteils, der Anlage und dem Material ab. Im AM Surf konnten nach den ersten Musterdrucken die Ursachen, die die Oberflächenqualität beeinflussen, nicht eindeutig ermittelt werden. Daher wurde eine Bewertung der Druckparameter einer DMG Lasertec 30 auf der Grundlage eines Versuchsplans durchgeführt und anhand von Oberflächenrauheitskennzahlen ausgewertet. Die Ergebnisse zeigten, dass bei Verwendung einer linienbasierten oder einer oberflächenbasierten Messung die Konturleistung und der Laserfokusbereich die Druckparameter waren, die den größten Einfluss auf die Oberflächenrauheit hatten.

Vysoká variabilita tiskových parametrů při laserovém tavení kovů může vést k výrobkům, které nesplňují konstrukční požadavky pro konkrétní použití. Volba materiálu navíc přináší další stupeň konstrukční volnosti. Mezi problémy s kvalitou patří vnitřní poréznost a s ní spojená nižší relativní hustota, nedostatečné spájení a špatná kvalita povrchu. Ačkoli se několik studií pokusilo optimalizovat tiskové parametry v SLM, výběr správných nastavení stále silně závisí na geometrii dílu, zařízení a materiálu. V AM Surf nebylo po prvních vzorových tiscích možné jednoznačně určit příčiny, které ovlivňují kvalitu povrchu. Proto bylo na základě experimentálního plánu provedeno hodnocení tiskových parametrů zařízení DMG Lasertec 30 a vyhodnoceno na základě ukazatelů drsnosti povrchu. Výsledky ukázaly, že při použití měření založeného na linii nebo na povrchu byly konturový výkon a průměr laserového fokusu tiskovými parametry, které měly největší vliv na drsnost povrchu.



Eines der wichtigsten Ergebnisse dieser Forschungsarbeit war das jüngste Experiment, bei dem mittels akustischer Rastermikroskopie (SAM) die Oberflächenrauheit als Indikator für die Oberflächenqualität gemessen wurde. Die implementierte Methode und der Algorithmus wurden mit laserbasierten und optischen Messverfahren verglichen; die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Da SLM die Herstellung komplexer Geometrien und innerer Hohlräume ermöglicht, die mit herkömmlichen Techniken nur schwer zu bewerten sind, könnte SAM als potenzieller Ansatz zur Beurteilung sowohl der Außen- als auch der Innenoberflächen additiv gefertigter Metallteile untersucht werden. Im Gegensatz zur Fokusvariationsmikroskopie und zur CT-Tomographie, die durch Zugänglichkeit, Auflösung oder Kosten eingeschränkt sind, könnte SAM eine einfachere, zerstörungsfreie Alternative für die Oberflächenprüfung bieten. Dies wirft folgende Fragen auf: Ist es möglich, 3D-gedruckte Metallteile mithilfe von SAM zuverlässig zu prüfen? Kann diese Methode Ergebnisse liefern, die mit etablierten Techniken wie der Tasterprofilometrie und der CT-Tomographie vergleichbar sind?

Jedním z nejdůležitějších výsledků této výzkumné práce byl nejnovější experiment, při kterém byla pomocí akustické rastrové mikroskopie (SAM) změřena drsnost povrchu jako indikátor kvality povrchu. Implementovaná metoda a algoritmus byly porovnány s laserovými a optickými měřicími metodami; výsledky jsou shrnuty v tabulce výše. Vzhledem k tomu, že SLM umožňuje výrobu složitých geometrií a vnitřních dutin, které jsou pomocí konvenčních technik obtížně hodnotitelné, mohla by být SAM zkoumána jako potenciální přístup k hodnocení jak vnějších, tak vnitřních povrchů aditivně vyráběných kovových dílů. Na rozdíl od mikroskopie s proměnnou hloubkou ostrosti a CT tomografie, které jsou omezeny dostupností, rozlišením nebo náklady, by SAM mohla nabídnout jednodušší, nedestruktivní alternativu pro kontrolu povrchu. To vyvolává následující otázky: Je možné spolehlivě kontrolovat 3D tištěné kovové díly pomocí SAM? Může tato metoda poskytnout výsledky srovnatelné s etablovanými technikami, jako je profilometrie s hmatovým snímačem a CT tomografie?



Sample	SAM (R_a in μm)		Optical (R_a in μm)		Laser (R_a in μm)	
Standard -50 μm	51.60	3.20%	51.48	2.96%	56.55	13.10%
Standard -25 μm	28.53	14.12%	26.49	5.96%	23.60	5.60%
Standard -12.5 μm	12.92	3.36%	11.57	7.44%	11.91	4.72%
Cube 1- Side A	16.46		11.21		14.74	
Cube 2- Side A	17.70		11.81		14.87	
Cube 3- Side A	16.91		11.37		15.37	

Das Potential der Oberflächenoptimierung von 3D gedruckten metallischen Bauteilen - 316L Edelstahl

LPBF-gefertigte 316L Bauteile besitzen häufig raue Oberflächen mit anhaftenden Pulverpartikeln und oberflächennahen Defekten. Dies kann die Korrosionsbeständigkeit und Bauteilzuverlässigkeit beeinträchtigen.

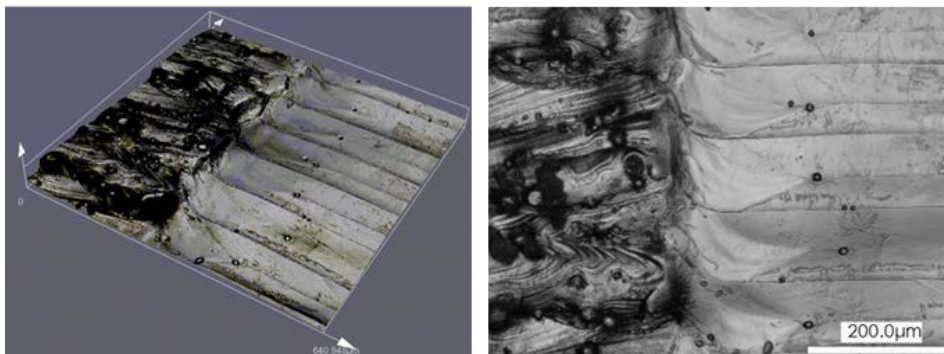


Abbildung 1: Vergleich der LPBF 316L Oberfläche vor und nach dem Laserumschmelzen in 3D Topographie und 2D Ansicht.

Lösung

Durch Laserumschmelzen wird eine dünne Randschicht lokal aufgeschmolzen und wieder erstarrt. Dadurch wird die Oberfläche geglättet und homogenisiert.

Ergebnis und Perspektive

Die Oberflächenrauheit konnte durch geeignete Laserparameter um bis zu den Faktor 10 reduziert werden. Gleichzeitig zeigen die Polarisationsmessungen eine verbesserte Korrosionsbeständigkeit der laserbehandelten Oberfläche. Damit bietet das Verfahren Unternehmen eine flexible Möglichkeit, die Qualität und Lebensdauer additiv gefertigter 316L Bauteile zu erhöhen.

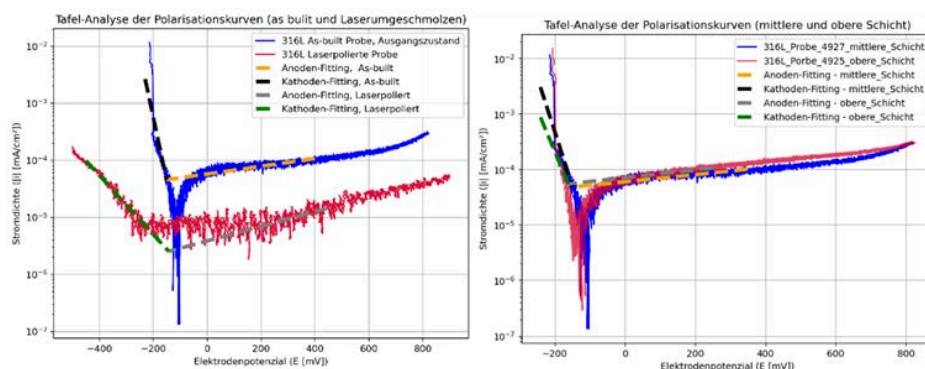
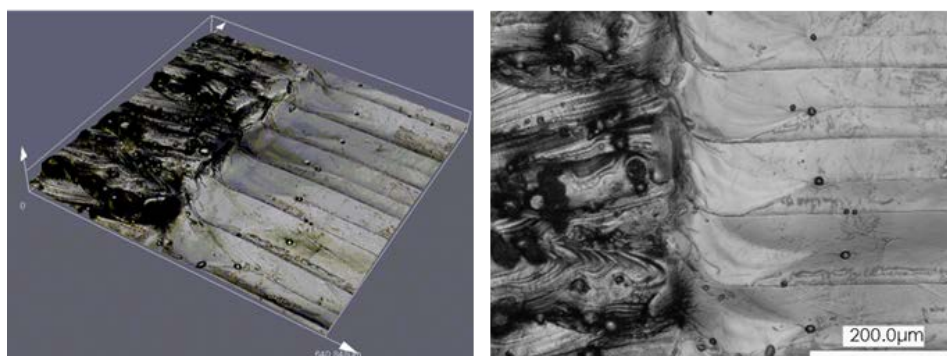


Abbildung 2: Polarisationskurven zur Bewertung des Korrosionsverhaltens unbehandelter und laserbehandelter LPBF-316L-Oberflächen

Potenciál optimalizace povrchu 3D tištěných kovových component - nerezová ocel 316L

Součásti z materiálu 316L vyrobené technologií LPBF mají často drsný povrch, na kterém ulpěly částice prášku, nebo defekty v blízkosti povrchu. To může mít negativní vliv na jejich odolnost proti korozi a životnost dílu.



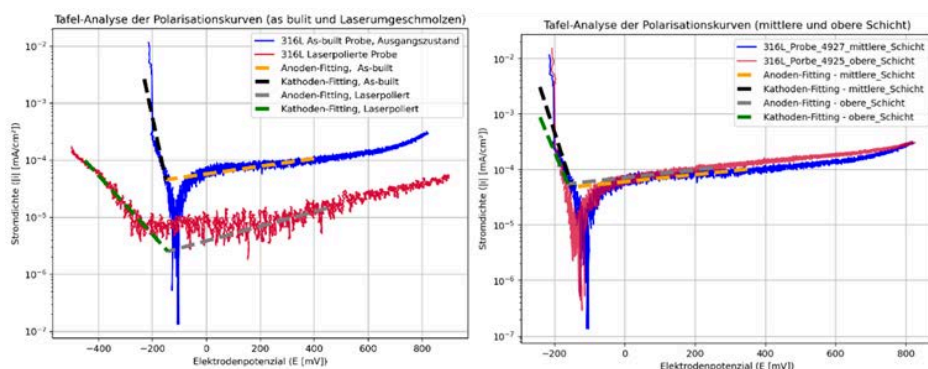
Obrázek 1: Porovnání povrchu materiálu LPBF 316L před a po laserovém přetavení v 3D topografii a 2D pohledu.

Řešení

Laserovým přetavením se lokálně roztaví tenká povrchová vrstva, která následně opět ztuhne. Tím se povrch vyhladí a homogenizuje.

Výsledky a perspektivy

Díky vhodným parametrům laseru se podařilo snížit drsnost povrchu až desetinásobně. Současně polarizační měření ukazují, že laserem takto upravený povrch vykazuje lepší odolnost proti korozi. Tato metoda tak firmám nabízí flexibilní možnost, jak zvýšit kvalitu a životnost dílů z nerezové oceli 316L vyrobených aditivní technologií.



Obrázek 2: Polarizační křivky pro hodnocení korozního chování neošetřených a laserem ošetřených povrchů z materiálu 316L po LPBF

Effiziente Methode zur stützstrukturarmen Topologieoptimierung für die additive Fertigung

Problem

Die Ergebnisse der Topologieoptimierung führen zu bionischen Strukturen, die oft als optimale Designs angesehen werden. Diese beinhaltet allerdings viele Bereiche, die während des additiven Herstellungsprozesses zusätzliche Stützstrukturen erfordern, unabhängig der Ausrichtung im Bauraum.

Lösung

Neben der Entwicklung eines Tools auf Basis von Open-Source-Software wird eine neuartige Fertigungsbeschränkung eingeführt. Dieser Algorithmus basiert auf einer einfachen, stationären thermischen Analyse, die in den Workflow der Topologieoptimierung integriert wird.

Ergebnisse

Ein Tool für die Topologieoptimierung wurde auf Basis der Open-Source-Finite-Elemente-Software CalculiX und Python entwickelt. Dies könnte für kleine Unternehmen und im akademischen Umfeld von großem Interesse sein. Es fallen keine Lizenzkosten an, und die Open-Source-Natur erleichtert die Erweiterung um zusätzliche Funktionen. Abbildung 1 zeigt die bekannte GE-Bracket Challenge als Benchmark. Abbildung 2 veranschaulicht ein einfaches 2D-Balkenproblem mit der neuartigen Beschränkung für die additive Fertigung. Damit wird in diesem Beispiel eine Reduzierung der notwendigen Stützstrukturen veranschaulicht. Die Erweiterung der 3D-Fähigkeiten ist abgeschlossen. Teile mit industrieller Anwendung befinden sich in der Entwicklung. Diese werden anschließend als Muster gefertigt und untersucht.



Abbildung 1: Designraum der GE Bracket Challenge und Ergebnisse der Topologieoptimierung der kommerziellen Software und Eigenentwicklung (5% Steifigkeitsunterschied)



Abbildung 2: Designraum eines 2D Balkenproblems und Ergebnisse der freien Topologieoptimierung und der neuartigen Methode für die additive Fertigung

Účinná metoda optimalizace topologie s minimem nosných struktur pro aditivní výrobu

Problém

Výsledky topologické optimalizace vedou k bionickým strukturám, které jsou často považovány za optimální návrhy. Tyto struktury však obsahují mnoho oblastí, které během procesu aditivní výroby vyžadují dodatečné podpurné struktury, a to bez ohledu na jejich orientaci v tiskovém prostoru.

Řešení

Kromě vývoje nástroje založeného na open-source softwaru se zavádí nový typ výrobního omezení. Tento algoritmus vychází z jednoduché stacionární tepelné analýzy, která je integrována do pracovního postupu topologické optimalizace.

Výsledky

Byl vyvinut nástroj pro topologickou optimalizaci založený na open-source softwaru pro výpočty metodou konečných prvků CalculiX a jazyku Python. To by mohlo být velmi zajímavé pro malé podniky a akademické prostředí. Nevznikají žádné náklady na licence a díky open-source povaze je snadné nástroj rozšířit o další funkce. Obrázek 1 ukazuje známou výzvu GE Bracket Challenge jako referenční test. Obrázek 2 ilustruje jednoduchý 2D problém s nosníkem s novým omezením pro aditivní výrobu. V tomto příkladu je tak znázorněno snížení počtu nezbytných podpurných struktur. Rozšíření 3D funkcí je dokončeno. Součásti pro průmyslové použití jsou ve vývoji. Ty budou následně vyrobeny jako vzorky a prozkoumány.



Obrázek 1: Návrhový prostor soutěže GE Bracket Challenge a výsledky optimalizace topologie provedené komerčním softwarem a vlastním vývojem (5% rozdíl v tuhosti)

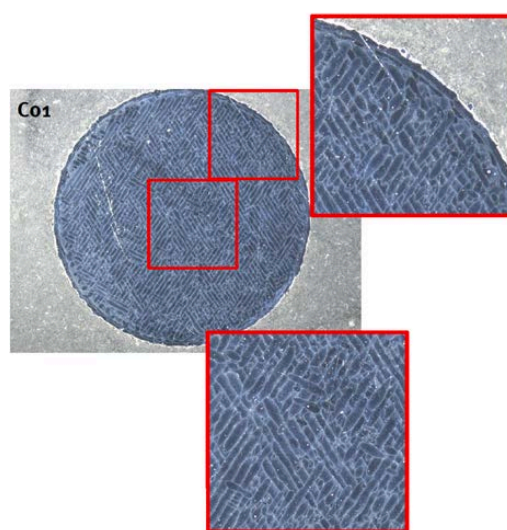
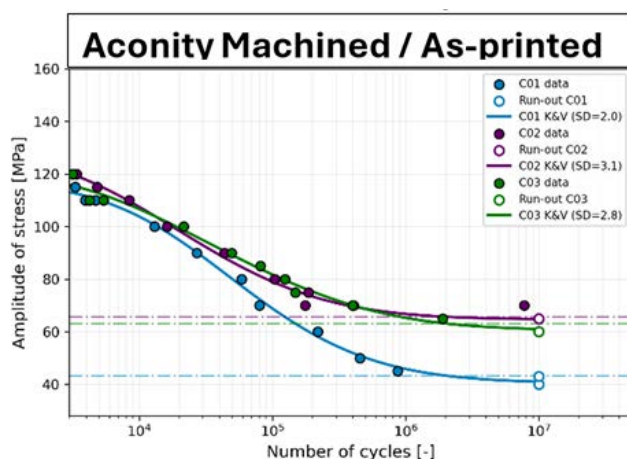


Obrázek 2: Návrhový prostor pro 2D nosníkový problém a výsledky volné topologické optimalizace a nové metody pro aditivní výrobu

Integrita povrchu jako klíčový faktor ovlivňující únavovou životnost kovů vyrobených aditivní technologií

Naše práce v uplynulých letech se zaměřila na únavové chování materiálů vyrobených aditivní technologií, především hliníkové slitiny L-PBF AlSi10Mg a nerezové oceli 316L. U slitiny AlSi10Mg studie ukázala, že únavové chování je ovlivněno komplexně, a sice interakcí integrity povrchu, tepelného zpracování, stavu prášku, výskytu defektů a tepelné historie vyvolané procesem. Pro identifikaci hlavních faktorů ovlivňujících únavovou životnost byly provedeny zkoušky vysokocyklové únavy, zkoušky tahem, měření tvrdosti, analýza pórovitosti, charakterizace mikrostruktury, analýza tepelného rozptylu a fraktografie. Výsledky pro AlSi10Mg jasně potvrdily, že kvalita povrchu je jedním z dominantních faktorů v režimu HCF: snížení drsnosti vzorků Aconity TWO ze stavu po vyrobení (as built) na stav po obrábění a leštění zvýšilo únavovou pevnost při 10^7 cyklech ze 43 MPa na 66 MPa.

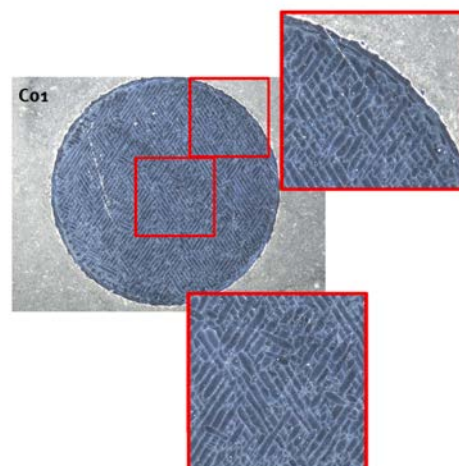
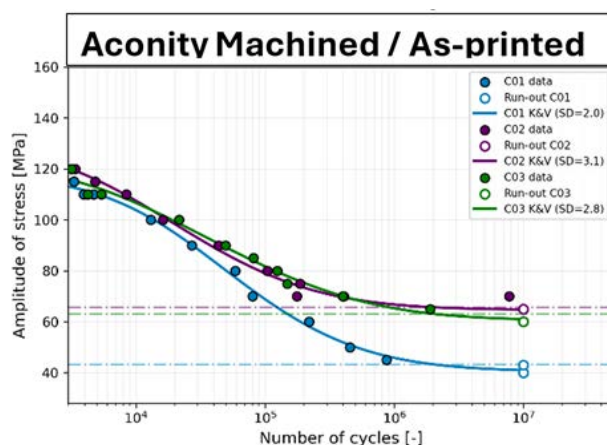
Zároveň byl účinek tepelného zpracování silně závislý na konkrétním procesu. Vzorky vyrobené bez předehřátí platformy těží z tepelného zpracování po procesu, zejména v režimu HCF, zatímco vzorky vyrobené při teplotě platformy přibližně 220 °C vykazovaly po zpracování T240 pouze omezené zlepšení v důsledku stárnutí in situ a relaxace napětí během výroby. Fraktografická analýza dále ukázala, že velké vady způsobené nedostatečným tavením mohou dominovat únavovému selhání a nelze je plně kompenzovat obráběním nebo tepelným zpracováním. Podobné trendy byly pozorovány i v širším rámci projektu: u materiálu 316L byly vybrané vzorky dodatečně ošetřeny laserovým rázovým kovářím v centru HiLASE v Dolních Břežanech a u všech zkoumaných materiálů byly jako klíčové faktory ovlivňující únavovou životnost identifikovány povrchový stav, vady v blízkosti povrchu a chování při vzniku trhlin.



Die Oberflächenintegrität als entscheidender Faktor für die Ermüdungslebensdauer von additiv gefertigten Metallen

Unsere Arbeit in den vergangenen Jahren konzentrierte sich auf das Ermüdungsverhalten von additiv gefertigten Werkstoffen, insbesondere der Aluminiumlegierung L-PBF AlSi10Mg und des Edelstahls 316L. Bei der Legierung AlSi10Mg hat die Studie gezeigt, dass das Ermüdungsverhalten komplex beeinflusst wird, und zwar durch das Zusammenspiel von Oberflächenintegrität, Wärmebehandlung, Pulverzustand, Auftreten von Defekten und der durch den Prozess hervorgerufenen thermischen Vorgeschichte. Zur Identifizierung der Hauptfaktoren, die die Ermüdungslebensdauer beeinflussen, wurden Hochzyklus-Ermüdungsversuche, Zugversuche, Härtemessungen, Porositätsanalysen, Mikrostrukturcharakterisierungen, Analysen der Wärmeverteilung und Fraktografien durchgeführt. Die Ergebnisse für AlSi10Mg bestätigten eindeutig, dass die Oberflächenqualität einer der entscheidenden Faktoren im HCF-Modus ist: Die Verringerung der Rauheit der Aconity TWO-Proben vom Zustand „as built“ auf den Zustand nach der Bearbeitung und dem Polieren erhöhte die Dauerfestigkeit bei 10^7 Zyklen von 43 MPa auf 66 MPa.

Gleichzeitig war die Wirkung der Wärmebehandlung stark vom jeweiligen Verfahren abhängig. Proben, die ohne Vorwärmen der Plattform hergestellt wurden, profitieren von der Wärmebehandlung nach dem Prozess, insbesondere im HCF-Modus, während Proben, die bei einer Plattformtemperatur von etwa 220 °C hergestellt wurden, nach der T240-Behandlung nur eine begrenzte Verbesserung zeigten, was auf die In-situ-Alterung und die Spannungsrelaxation während der Herstellung zurückzuführen ist. Die fraktografische Analyse zeigte ferner, dass große, durch unzureichendes Schmelzen verursachte Defekte das Ermüdungsversagen dominieren können und sich durch Zerspanung oder Wärmebehandlung nicht vollständig kompensieren lassen. Ähnliche Tendenzen wurden auch im weiteren Rahmen des Projekts beobachtet: Bei dem Werkstoff 316L wurden ausgewählte Proben zusätzlich im HiLASE-Zentrum in Dolní Břežany einer Laser-Schockumformung unterzogen, und bei allen untersuchten Werkstoffen wurden der Oberflächenzustand, oberflächennahe Fehler und das Rissbildungsverhalten als Schlüsselfaktoren für die Ermüdungslebensdauer identifiziert.



Notes

AM SURF



**Realizace projektu je podpořena z prostředků EU
z programu Interreg Bavarsko - Česko 2021-2027.**

**Das Projekt wird mit EU-Mitteln aus dem Programm
Interreg Bayern-Tschechische Republik 2021-2027
gefördert.**

Interreg



**Co-funded by
the European Union**

Bayern – Česko
