



SUBTRAKTIVE CHEMISCHE PROZESSE DIFFERENZIERT UND ERKLÄRT

Es gibt zwei Hauptarten von subtraktiven chemischen Prozessen: (nicht spontane) elektrochemische Prozesse und rein chemische Prozesse. In Wirklichkeit handelt es sich bei beiden Prozessen (auf einer sehr technischen Ebene) um elektrochemische Prozesse, da sie den Transfer von Elektronen beinhalten. Der Einfachheit halber werden wir in diesem Artikel spontane (galvanische/voltaische) Prozesse als rein chemisch und nicht-spontane elektrochemische/elektrolytische Prozesse als elektrochemisch bezeichnen. Beide Verfahrensarten weisen Vor- und Nachteile auf, wenn sie als subtraktive Materialabtragungsverfahren eingesetzt werden. Es gibt natürlich viele elektrochemische (z. B. Galvanisieren) und rein chemische Verfahren (z. B. Passivieren), deren Hauptzweck nicht darin besteht, Metall von einem Bauteil zu entfernen, aber diese Verfahren werden in dieser Rubrik nicht behandelt.

REIN CHEMISCHE PROZESSE

Rein chemische Prozesse (oder genauer gesagt spontane galvanische elektrochemische Prozesse, bei denen $\Delta G_0 < 0$ und ΔG die freie Gibbs-Energie der Reaktion ist), die Metall subtraktiv von einem Bauteil entfernen, werden allgemein als chemisches Fräsen oder chemisches Ätzen bezeichnet. Seltener werden diese Prozesse

auch als chemisches Polieren bezeichnet. Tatsächlich bezeichnen diese Begriffe drei verschiedene Prozesse, obwohl zwischen ihnen starke Ähnlichkeiten bestehen können.

Das chemische Fräsen (CM) lässt sich vielleicht am besten als die kontrollierte Auflösung des Oberflächenmaterials von einem Bauteil beschreiben. CM ist im Allgemeinen ein Massenmaterialverfahren und kann als chemische Bearbeitung bezeichnet werden.

Das chemische Ätzen (CE) kann als ein von CM abgeleitetes Verfahren betrachtet werden, da es sich ebenfalls um eine kontrollierte chemische Auflösung von Oberflächenmaterial handelt. Es wird jedoch in der Regel in Verbindung mit einer chemisch inerten Maskierung verwendet, um Muster und/oder Designs auf dem Werkstück zu erzeugen. Die Materialabtragsmengen sind in der Regel gering, und auf einem Großteil des Werkstücks findet kein Materialabtrag statt. Weder CM noch CE sind von Natur aus darauf ausgerichtet, die Oberflächenrauheit einer Komponente zu verringern. Beide Verfahren können diesen Effekt haben, jedoch ist diese Verringerung/Veränderung der Oberflächenrauheit in den meisten Fällen eher ein Nebeneffekt als ein primäres Ergebnis.

Das chemische Polieren (CP) kann, ähnlich wie das CE, als ein von CM abgeleitetes Verfahren betrachtet werden. Während sich CM jedoch auf den Abtrag von Oberflächenmaterial konzentriert, liegt der Schwerpunkt des CP auf der effizienten Veränderung der Oberflächenstruktur. Diese effiziente Veränderung der Textur wird in der Regel dadurch erreicht, dass man versucht, den Materialabtrag zu minimieren und gleichzeitig die Rauheit/Textur zu maximieren.

Bei allen drei Verfahren wird eine „aktive“ chemische Lösung verwendet, die in der Lage ist, Metall spontan von der Oberfläche des Teils bzw. der Teile zu lösen. Diese aktiven chemischen Lösungen sind typischerweise ein Gemisch aus starken Säuren oder Basen. Ein Teil der Neuartigkeit und der Unterschiede zwischen den drei Verfahren lässt sich auf die Unterschiede in diesen chemischen Lösungen zurückführen. Da sich CM auf die Entfernung von Massenmaterial konzentriert, sind chemische Lösungen erforderlich, die relativ einfach zu warten sind, um Kosteneffizienz zu gewährleisten. CE und CP, die typischerweise einen geringeren Materialabtrag erfordern, können sich stärker auf die Prozesssteuerung konzentrieren.

Die vielleicht bemerkenswerteste Stärke bzw. der größte Vorteil rein chemischer Verfahren ist ihre Fähigkeit, Material mit einem hohen Maß an Gleichmäßigkeit von geometrisch komplexen Bauteilen zu entfernen. Da die einzige Voraussetzung für die Wirksamkeit des Verfahrens (vorausgesetzt, es wird eine gut entwickelte chemische Formulierung/ein gut entwickeltes chemisches Verfahren verwendet) die Fähigkeit der chemischen Lösung ist, mit der Oberfläche des Teils in Kontakt zu kommen, bieten chemische Verfahren ein hohes Maß an Flexibilität hinsichtlich der Form der Teile. Darüber hinaus verursachen chemische Prozesse keine mechanischen oder Restspannungen in den Bauteilen und können je nach Beschaffenheit des Teils und den vorangegangenen Umformschritten die Korrosions- und/oder Ermüdungsbeständigkeit erhöhen.

Mögliche Schwächen/Nachteile rein chemischer Verfahren sind vor allem die Komplikationen/Anforderungen, die mit dem Umgang mit in der Regel aggressiven Chemikalien verbunden sind. In den meisten Fällen entstehen Prozessabgase, die abgesaugt und/oder gereinigt werden müssen, bevor sie in die Umwelt gelangen. Bei dem Prozess entstehen flüssige Abfälle, die häufig vor der industriellen Entsorgung neutralisiert werden müssen. Bediener, die in unmittelbarer Nähe der chemischen Lösung arbeiten, müssen Schutzausrüstung tragen, insbesondere bei Formulierungen, die für chemisch inerte Materialien wie Superlegierungen und feuerfeste Legierungen entwickelt wurden. Schließlich besteht die Gefahr einer chemischen Beschädigung der Teile, wenn der Prozess und/oder die chemische Zusammensetzung nicht ausreichend entwickelt oder unsachgemäß angewendet werden.

Wie alle Werkzeuge haben auch rein chemische Verfahren ihren Platz in der gesamten Produktionslieferkette. Trotz einiger der oben genannten Herausforderungen, die mit diesen Prozessen verbunden sind, kann ihr Nutzen bei geeigneten Anwendungen oder Anwendungsfällen ihre Schwächen überwiegen (siehe Abbildungen 1 und 2). Während CM, CE und CP in der Zahnradfertigungsindustrie möglicherweise nicht als gängige Verfahren angesehen werden, kann die Nital-Ätzprüfung als eine Form von CM oder CP betrachtet werden (oder zumindest betrachtet werden). Obwohl der Zweck der Nital-Ätzprüfung nicht darin besteht, Massenmaterial zu entfernen oder die Oberflächenstruktur kontrolliert zu verändern, handelt es sich um einen chemischen Auflösungsprozess auf Basis einer starken Säure, der somit die allgemeinen Kriterien für die Definition eines oder beider dieser Verfahren erfüllt.

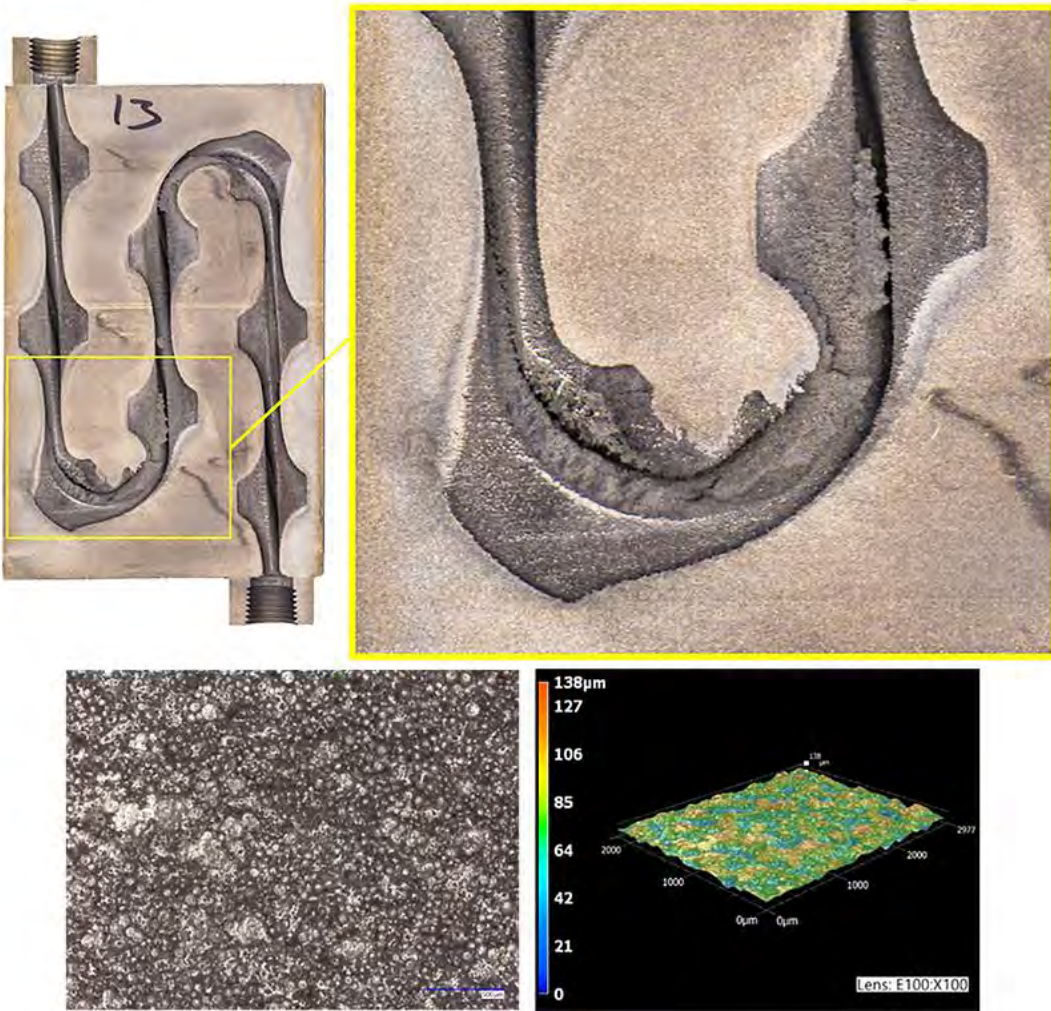


Abbildung 1: Beispiel für Innenflächen mit einer hohen anfänglichen Rauheit/Textur.

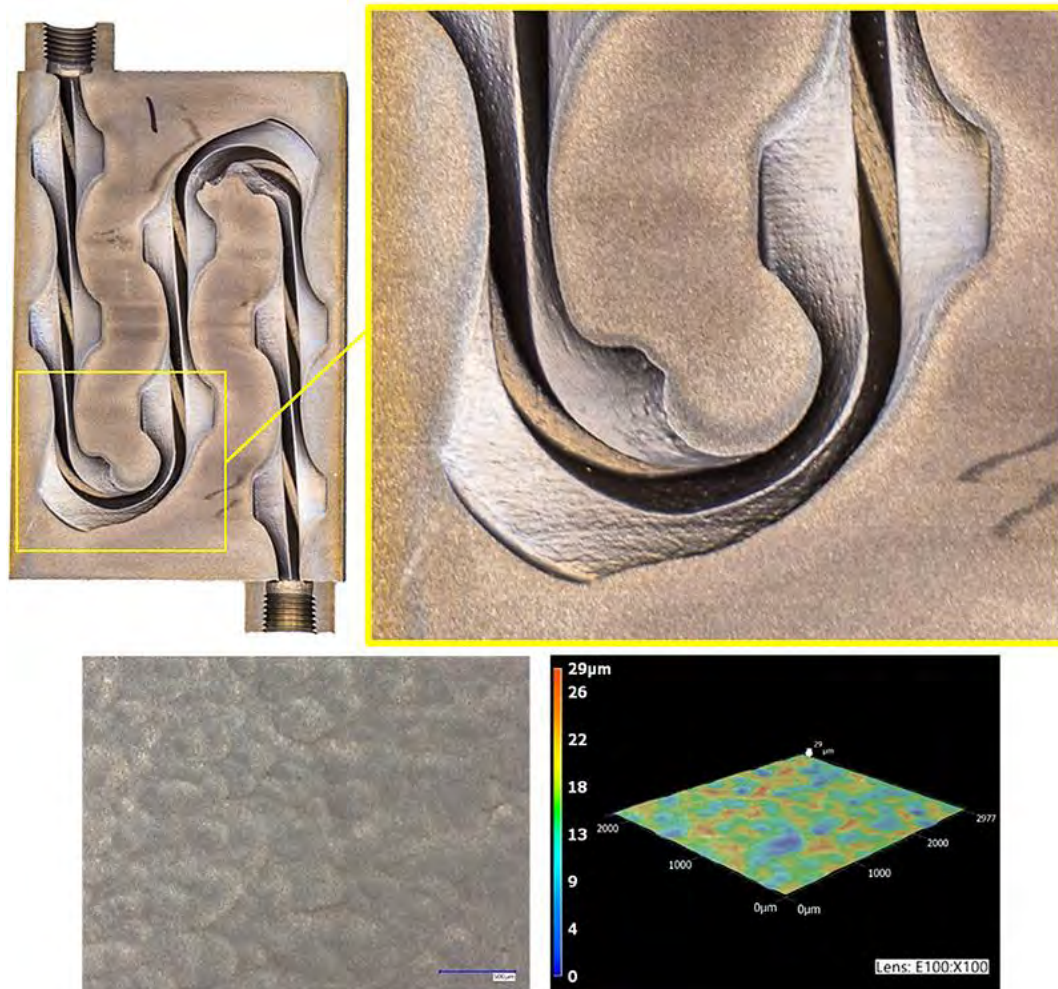


Abbildung 2: Beispiel für Innenflächen nach Anwendung eines effektiven chemischen Polierverfahrens.

NICHT SPONTANE ELEKTROCHEMISCHE PROZESSE

Ähnlich wie bei rein chemischen Prozessen gibt es mehrere Arten/Varianten subtraktiver elektrolytischer/elektrochemischer Prozesse, die sowohl starke Ähnlichkeiten auf hoher Ebene als auch wichtige Unterschiede aufweisen. Die beiden wichtigsten subtraktiven elektrochemischen Verfahren sind die elektrochemische Bearbeitung (ECM) und das Elektropolieren (EP). Beide Verfahren beruhen auf einer erzwungenen elektrochemischen Reaktion, um Metall aus einem Bauteil aufzulösen bzw. zu entfernen. Die Reaktion erfolgt, indem das Werkstück (das als Anode dient) und eine Kathode in einen Elektrolyten getaucht werden und ein Strom oder eine Spannung angelegt wird, um die Metallauflösung aus dem Werkstück zu induzieren. Beide Verfahren können mit kontrolliertem oder fluktuierendem (manchmal auch gepulstem) Strom/Potenzial arbeiten.

Ähnlich wie bei CM handelt es sich bei ECM um ein „Verfahren zur Massenmaterialabtragung“. In vielerlei Hinsicht ist ECM jedoch eher mit dem CNC-Fräsen als mit dem CM vergleichbar, da es sich bei ECM in erster Linie um einen Umformprozess handelt (mit dem auch die Oberflächenbearbeitung erreicht werden kann). Umgekehrt ist EP eher mit CP vergleichbar, da sein Hauptzweck darin besteht, die Oberflächenrauheit/Textur zu verbessern. EP wäre jedoch im Allgemeinen eher mit CM (und nicht mit CP) vergleichbar, da hier eine weitgehend generische Kathode zur Steigerung der Prozesskosteneffizienz eingesetzt wird. Für ECM wird eine kundenspezifisch angefertigte Kathode benötigt, die das Gegenstück zur Geometrie des zu erzeugenden Bauteils sein muss. In diesem Kontext lässt sich ECM möglicherweise besser mit CE vergleichen; CE wird jedoch im Allgemeinen nicht als primäres Umformverfahren eingesetzt. Die Unterschiede zwischen den beiden Kathodentypen (generische vs. speziell angefertigte) sind auf die Natur der elektrochemischen Prozesse zurückzuführen.

Die Materialabtragsraten in elektrochemischen Prozessen werden durch die Stromdichte bestimmt, die wiederum in erster Linie vom Abstand zwischen Anode und Kathode sowie von der „Zugänglichkeit“ oder „Vorspannung“ der Werkstückoberfläche zum Strom-/Potentialunterschied abhängt (siehe Abbildung 3). Daher neigt EP aufgrund von Schwankungen in der Stromdichte dazu, Materialunterschiede auf verschiedenen Oberflächen mit zumindest mäßig komplexen Geometrien zu verursachen. Da EP am häufigsten für geringere Materialabtragungen verwendet wird, sind diese Materialabtragungsschwankungen für viele Anwendungen möglicherweise nicht problematisch. ECM verwendet eine speziell angefertigte Kathode, die als Gegenstück zur endgültigen Teilegeometrie konzipiert ist, und kann so während der Bearbeitung eine wesentlich gleichmäßigere Stromdichte aufrechterhalten, vorausgesetzt, dass die Kathode während des Prozesses bewegt werden kann, um den Abstand zwischen Kathode und Anode aufrechtzuerhalten.

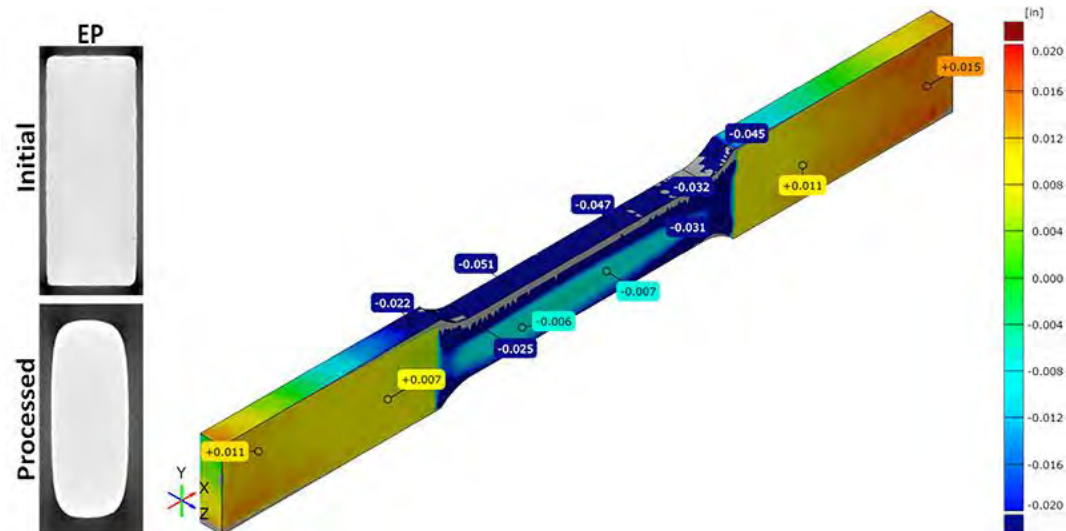


Abbildung 3: Beispiele für Röntgen-CT-Scans von Formveränderungen, die durch EP verursacht wurden (links), und 3D-Scans mit Blaulicht, die Unterschiede im Materialabtrag an der Oberfläche einer mit EP bearbeiteten Probe zeigen (rechts).

Ein wesentlicher Vorteil elektrochemischer Verfahren besteht in ihrer Fähigkeit, innerhalb kurzer Zeit „gute“ Oberflächenqualitäten bei reaktiven Materialien zu erzielen. Zu diesen reaktiven Materialien gehören chemisch hochbeständige Metalle wie Kobalt und Nickel-Superlegierungen. Im Vergleich zu CM erzielen EP oder ECM in der Regel eine bessere Endoberflächenbeschaffenheit; selbst CP bleibt in Bezug auf den für diese Legierungen erzielten Endrauheitswert tendenziell hinter EP/ECM zurück. Darüber hinaus werden sowohl CM als auch CP im Allgemeinen gefährlichere Chemikalien verwenden als die, die im EP/ECM-Elektrolyten verwendet werden (wobei zu beachten ist, dass viele Elektrolyte weiterhin starke Säuren und andere gefährliche Chemikalien enthalten). Bei geeigneten Materialien führen diese elektrochemischen Prozesse somit zu glatteren Oberflächen. Die Materialreaktivität variiert jedoch je nach Legierung, und es gibt Legierungen, bei denen EP/ECM Einschränkungen hinsichtlich der Materialabtragseffizienz und/oder der endgültigen Oberflächenqualität aufweisen (z. B. Titan).

Der größte Nachteil elektrochemischer Prozesse liegt in ihrer Abhängigkeit von der Stromdichte. Wie bereits erwähnt, führen Schwankungen der Stromdichte ohne eine maßgeschneiderte Kathode zu ungleichem Materialabtrag und unerwünschter Formveränderung. Da elektrochemische Prozesse naturgemäß nur auf Oberflächenrauheitsspitzen abzielen, ist ihr Nutzen bei der Verbesserung der mechanischen Ermüdungsbeständigkeit begrenzt. Obwohl die Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsrisiken bei elektrochemischen Prozessen im Vergleich zu rein chemischen Prozessen geringer sind, stellen viele Elektrolytlösungen immer noch eine erhebliche Gefahr dar. Es werden aktiv Forschungen durchgeführt, um die Gefährlichkeit dieser Elektrolyte zu verringern, und es sind einige „trockene“ EP-Verfahren entstanden, die die Risiken für die Bediener reduzieren. Insbesondere bei „trockenen“ EP-Verfahren werden die Vorteile der Entfernung des sauren, flüssigen Elektrolyten zumindest teilweise durch eine Verringerung der Prozesseffizienz in Bezug auf die Verarbeitungszeit und die Materialabtragskapazität ausgeglichen. Darüber hinaus muss der trockene Elektrolyt aus Sicht der Abfallwirtschaft weiterhin entsorgt werden. Schließlich besteht die Gefahr der Lochfraßbildung, wenn der Prozess nicht ordnungsgemäß angewendet/kontrolliert wird.

Wie bei rein chemischen Prozessen haben auch elektrochemische Prozesse ihre Schwächen, aber es gibt auch einige überzeugende Anwendungsfälle. ECM kann bei mäßig komplexen Geometrien eine gute Alternative zum CNC-Fräsen und Gießen darstellen. EP kann ein effektiver letzter Poliervorgang für Teile mit großem Volumen sein und eignet sich sowohl für die Einrichtungskosten einer halbkundenspezifischen Kathode als auch für die Materialabtragsabweichungen einer generischen Kathode. Keiner der beiden Prozesse ist in der Zahnradfertigungsindustrie besonders verbreitet, jedoch könnten beide bei Bedarf durchaus eingesetzt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass subtraktive elektrochemische und rein chemische Verfahren einen grundlegenden Unterschied in ihrem Materialabtragungsmechanismus aufweisen, der zu unterschiedlichen Stärken und Schwächen führt. Innerhalb dieser beiden Prozesskategorien gibt es eine Untergruppe relativ ähnlicher, aber dennoch einzigartiger Prozesse. Das Verständnis der Unterschiede zwischen diesen Teilprozessen ist wichtig für die Auswahl der geeigneten Lösung zur Materialabtragung/Oberflächenbearbeitung für Ihre Anwendung.

REFERENZEN

1. Diaz, J. Michaud, T. Mikulas, J. Boykin, N. Shamsaei, S. Shao, S. Lee, J. Pegues, T. Hall, J. Stull, T. Duffy, A. Mirabal, P. Gradl, 2024. "Surface post-treatment of additively manufactured components." Additive Manufacturing of High-Performance Metallic Materials, R. Pederson, J. Andersson, S. Joshi (Eds), Seiten 223 – 284, Elsevier (<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91885-5.00008-1>)
2. D. Landolt, Fundamental aspects of electropolishing, Electrochim. Acta (1987) 32, ([https://doi.org/10.1016/0013-4686\(87\)87001-9](https://doi.org/10.1016/0013-4686(87)87001-9))
3. K. Arvind, S. Apporva, K.S. Ashwin, H. Sumanth, T. Nanjundeswaraswamy, Chemical blanking and chemical milling process: an outline, J. Eng. Res. Appl. 9 (2019) 83–86, (<https://doi.org/10.9790/9622>)
4. M.M. Basha, S.M. Basha, V.K. Jain, M.R. Sankar, State of the art on chemical and electrochemical based finishing processes for additive manufactured features, Addit. Manuf. 58 (2022), 103028, (<https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103028>)
5. P.A. Jacquet, On the anodic behavior of copper in aqueous solutions of orthophosphoricacid, Trans. Elektrochem. Soc. (1936) 69, (<https://doi.org/10.1149/1.3498234>)
6. G.A. Longhitano, M.A. Larosa, A.L.J. Munhoz, C.A. de Carvalho Zavaglia, I. MCF, G.–
7. A. Longhitanoa, et al., Surface finishes for Ti–6Al–4V alloy produced by direct metal laser sintering, Mater. Res. 18 (2015) 838–842, (<https://doi.org/10.1590/1516-1439.014415>)
8. www.voxelinnovations.com