

XXL-Integralschmiedeteile für die Luftfahrt



Bild: www.stockadobe.com 274717168 ©Marko Hannula

Zur Herstellung großer Integralbauteile für die Luftfahrtindustrie benötigt man hydraulische Schmiedepressen mit hohen Presskräften und exzellenten Regeleigenschaften. Mit ihrem neuen Flaggschiff, der 540-MN-Pressen (60.000 US-t), verfügt die Fuchs-Gruppe nun über vier Großpressen zur Fertigung größter Bauteile aus Aluminium-, Titan- und Nickel-Werkstoffen für die Produktion von Komponenten für Flugzeugrumpf, -flügel und -antrieben. Die präzise Umsetzung und Überwachung der zuvor simulierten Prozesse stellt eine kosteneffiziente und werkstoffgerechte Herstellung sicher.

AUTOREN



Dr.-Ing. Thomas Witulski

ist Leiter Werkstoffe und Prozesse bei der Otto Fuchs KG in Meinerzhagen



Dr.-Ing. Klaus Welsch

ist Leiter Aerospace Division und Mitglied der Geschäftsleitung bei der Otto Fuchs KG in Meinerzhagen

Die Integralbauweise findet seit vielen Jahren bei Flugzeugstrukturen aus Aluminium oder Titan Anwendung [1], [2]. Dabei werden möglichst viele Einzelbauteile integriert, um Spannungssprünge an den Fugstellen zu vermeiden sowie Gewicht und Kosten zu senken. Bild 1 zeigt einen Flügelanschlussbeschlag der Transall C160 aus den 1960er-Jahren: Die damals 41 Einzelteile lassen sich durch ein einziges Gesenkschmiedeteil ersetzen.

Die aufkommende Hochgeschwindigkeitszerspanung ermöglichte es, große Bauteile kostengünstig aus der Walzplatte oder dem geschmiedeten Block zu fertigen. Dies förderte die Entwicklung von Legierungen, die auch bei größerer Dicke noch eine gute Kombination aus Festigkeit und Eigenspannungen bieten. Ein großer Nachteil der Integralbauweise mit Walzplatten ist der hohe Zerspanungsanteil von bis zu 95 Prozent des Rohmaterials [1]. Ein Maß für die kosteneffiziente Verwendung der teuren Luftfahrtwerkstoffe ist die Buy-to-Fly-Ratio, das Gewichtsverhältnis vom Rohteil zum fliegenden Produkt. Wie Bild 2 zeigt, kann die B/F-Ratio im ungünstigsten Fall den Faktor 20:1 überschreiten.

Die Kostenreduzierung durch Herstellung von Gesenkschmiedeteilen anstelle der Verwendung von dicken Walzplatten oder freiformgeschmiedeten rechteckigen Blöcken ist lange bekannt. Bild 3 zeigt ein Alu-Integralbauteil, hergestellt in den 1960er-Jahren auf der damals weltgrößten privaten Schmiedepresse am Standort Meinerzhagen. Die 1964 in Betrieb genommene, mehrfach modernisierte Presse hat eine hydraulische Presskraft von 300 MN (entspricht 30.000 t) und wird zum

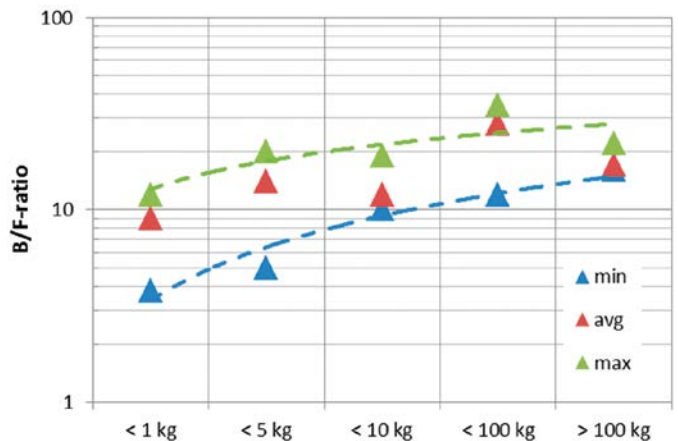


Bild 2: B/F-Ratio von Walzplatten als Funktion vom Bauteilgewicht [3]

Schmieden großer Bauteile aus Aluminium-, Titan- und Nickellegierungen verwendet.

Das weltweite Wachstum im Luftfahrtmarkt hat seit 100 Jahren beachtliche Investitionen in Großpressen ausgelöst. (Bild 4). Dem technischen und wirtschaftlichen Bedarf folgend, verdoppelte sich die Presskraft neuer Großpressen seit den 1950er-Jahren systematisch bis auf zirka 500 MN. Übergroße Aggregate wurden jeweils mit Staatsmitteln in den USA, Russland, Frankreich und China errichtet. Alle diese Entwicklungen tragen dazu bei, die B/F-Ratio zu verbessern.

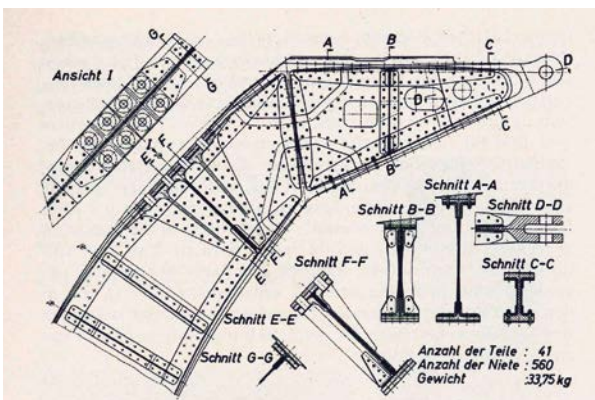


Bild 1: Differenzialbauweise und Integral-Schmiedeteil [2]



Bild 3: Fahrwerksträger der Boeing 727 (links) und 300 MN-Pressen (rechts)

WERKSTOFFENTWICKLUNG FÜR GROßSCHMIEDETEILE

Die Integralbauweise mit Aluminiumwerkstoffen ist jedoch nur mit geeigneten Legierungen möglich. Da die Legierungen der 2xxx- und 7xxx-Familien ihre Festigkeit durch Aushärtung nach dem Abschrecken aus dem Lösungsglühen erzielen, ist die Abkühlgeschwindigkeit und damit der Bauteilquerschnitt entscheidend für das Festigkeitsniveau.

Bild 5 stellt den Abfall der Festigkeit in Abhängigkeit von der Dicke für mehrere hochfeste Legierungen dar.

Bei Querschnitten unter 5 Millimetern (diese sind typisch für Profile und Bleche) befinden sich nach dem Abschrecken von Lösungsglüh-temperatur noch alle Legierungselemente in Lösung, sodass bei der anschließenden Aushärtung die festigkeitssteigernden Phasen sehr fein ausgeschieden werden. Mit abnehmender Abkühlgeschwindigkeit bilden sich gröbere Phasen, die nicht mehr festigkeitssteigernd wirken und die gleichzeitig die Menge der noch nicht ausgeschiedenen Legierungselemente (das heißt die festigkeitssteigernden Phasen) reduzieren. Bei weiterer Erhöhung der Dicke sinkt die Festigkeit auf ein technisch unbrauchbares Niveau ab. Gängige Spe-

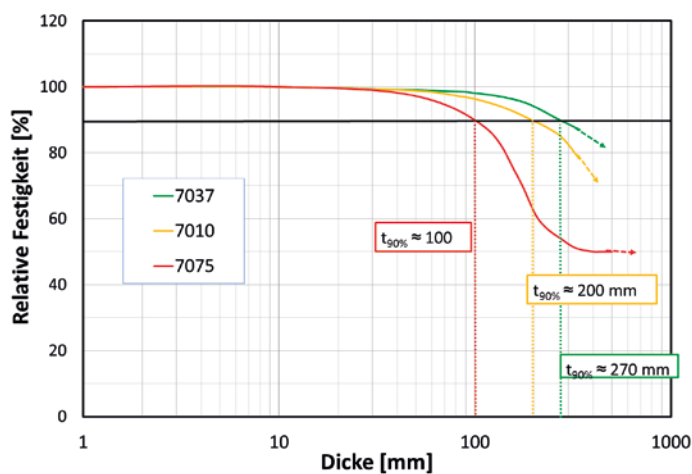


Bild 5: Abschreckempfindlichkeit von 7xxx-Legierungen

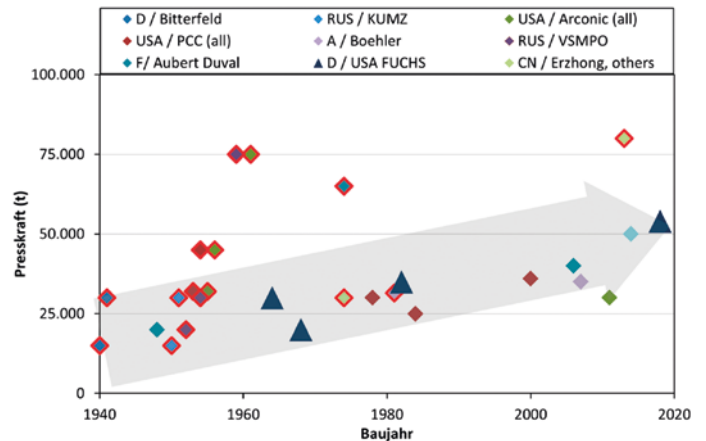


Bild 4: Historische Entwicklung der Großpressen

zifikationen beschränken daher den Anwendungsbereich auf Querschnitte, bei denen mindestens 90 Prozent der maximal erzielbaren Festigkeit erreicht werden können [4].

Neben der Abschreckgeschwindigkeit hat die chemische Zusammensetzung einen wesentlichen Einfluss auf die technisch erzielbare Festigkeit [5]: Das Maß des Festigkeitsabfalls in Abhängigkeit der Abschreckgeschwindigkeit beziehungsweise der Bauteildicke wird Abschreckempfindlichkeit genannt. Neben der hohen Festigkeit zielt die Entwicklung von Al-Legierungen deshalb auf eine geringe Abschreckempfindlichkeit, um dicke Bauteile mit guten Festigkeiten auszustatten. Die Integralbauweise hat diese Entwicklung seit den 1960er-Jahren gefördert. Nach der ersten Generation der 2000er-Legierungen erschloss die Legierung 7075 bis zu einer Dicke von zirka 100 Millimetern neue Festigkeitsklassen für den Flugzeugbau. Die weniger abschreckempfindlichen Legierungen 7010 und 7050 konnten dieses Maß auf 200 Millimeter ausweiten. Bild 6 zeigt die historische Entwicklung der im Flugzeugbau verwendeten Standard-Aluminiumlegierungen.

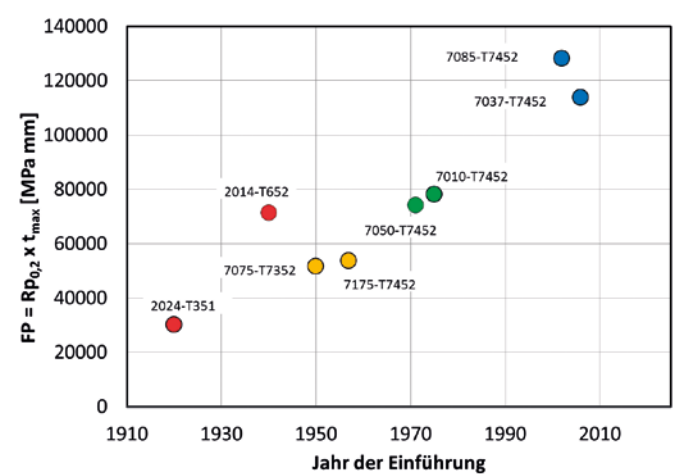


Bild 6: Festigkeitspotenzial von Luftfahrtlegierungen

Das Festigkeitspotenzial ist hier definiert als: $FP = t_{max} \times R_{p0,2}(t_{max})$, wobei t_{max} die Bauteildicke bei 90 Prozent der maximal erreichbaren Festigkeit darstellt. $R_{p0,2}(t_{max})$ ist die Dehngrenze bei einer Dicke von t_{max} für die jeweilige Legierung, hier in L-Richtung. Die Einführung großer aus Walzplatten gefräster Integralbauteile profitierte zugleich von der Entwicklung der Hochgeschwindigkeitszerspanung.

Der Einsatz von Walzplatten (aus 7010/7050) mit einer Dicke von mehr als 200 Millimetern führt zu Festigkeitseinbußen bei Integralbauteilen. Endkonturnahe Bauteilgeometrien von Gesenkschmiedeteilen bieten Vorteile bei der Festigkeit und der Materialausnutzung: (Bild 7).

Alle vier Bauteile wurden zunächst aus überdeckenden Walzplatten gefräst. Die Umstellung in Gesenkschmiedeteile führte zu

signifikanten Verbesserungen der B/F-Ratio, der Herstellkosten und der Bauteilfestigkeit durch geringere Wärmebehandlungsquerschnitte. Den Einfluss der Rippenhöhe auf die B/F-Ratio zeigt Bild 8.

Seit den 1990er-Jahren wurden abschreckempfindliche Legierungen wie 7085 und später 7037 entwickelt, um Rohteilabmessungen bis zu 280 Millimetern Dicke zu ermöglichen (Bild 5). Beide Legierungen haben gegenüber 7050 beziehungsweise 7010 einen deutlich höheren Zinkanteil bei zugleich reduziertem Mg- und Cu-Gehalt. Die größere Abschreckempfindlichkeit wird durch den Zinkanteil kompensiert, um die geforderte Festigkeit zu erzeugen [5]. Auch diese Legierungen werden weiter entwickelt, um beispielsweise das EAC-Risiko (EAC – Environmental-Assisted Cracking) zu reduzieren [6]. So lassen sich Integralbauteile in Zukunft mit noch größeren Querschnitten konstruieren.

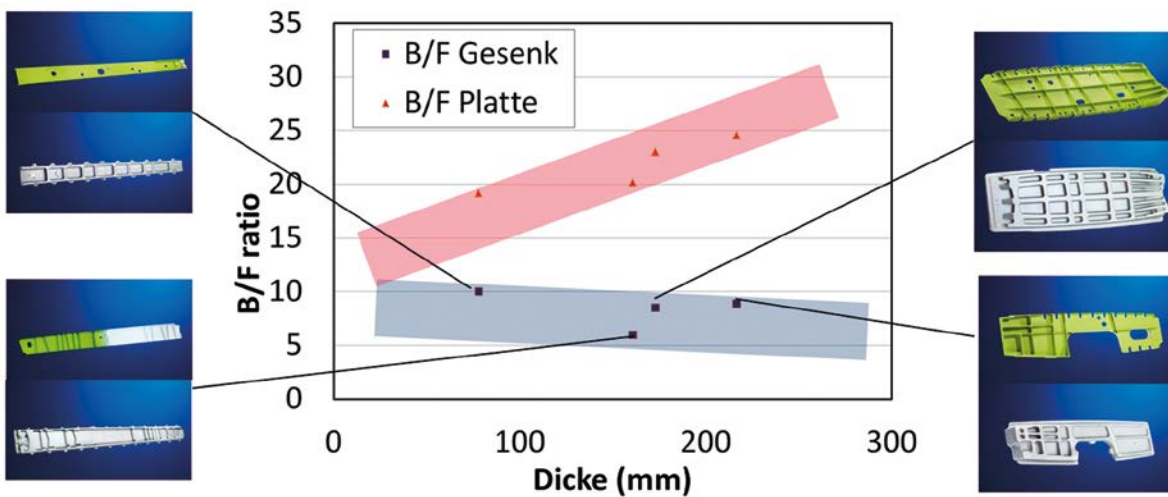


Bild 7: B/F-Ratio von Schmiedeteilen und Walzplatten

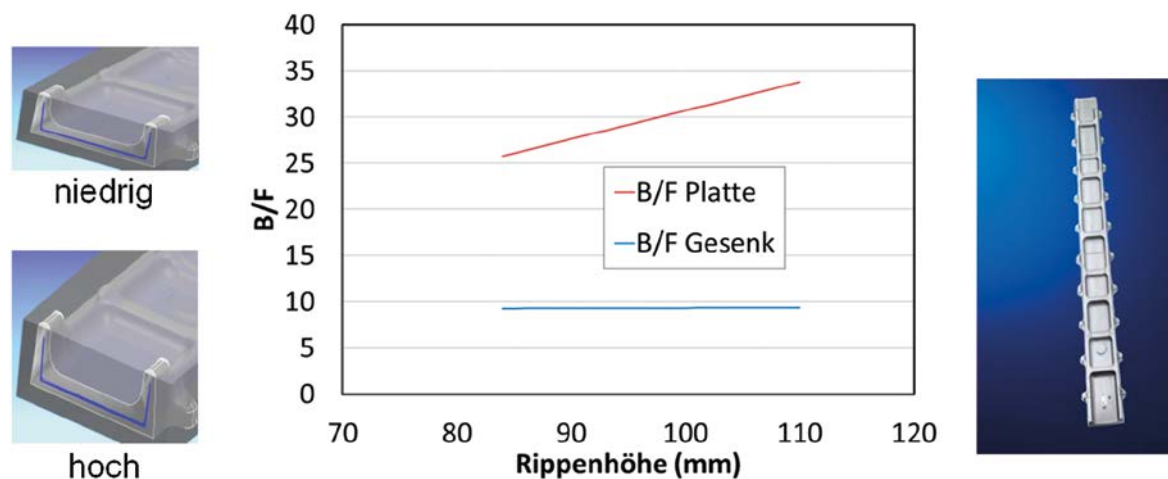


Bild 8: Einfluss der Rippenhöhe auf die B/F-Ratio

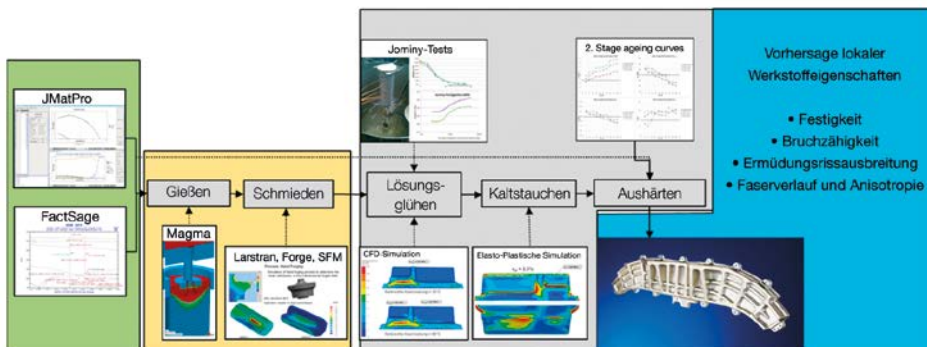


Bild 9: Prozesskettensimulation

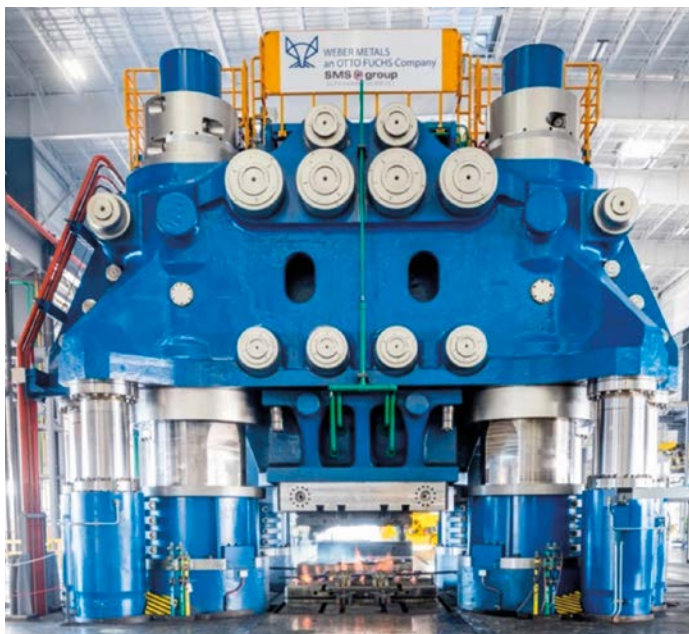


Bild 10: 540-MN-Pressen
bei Weber Metals
in Los Angeles
Bild: Otto Fuchs KG

WERKSTOFFENTWICKLUNGEN

Nach wie vor ist die statische Festigkeit einer Legierung die wichtigste Eigenschaft für die Auslegung eines Strukturbauteils. Immer mehr rückt jedoch das „Damage-Tolerant-Design“ als Auslegungskriterium in den Vordergrund, sodass neben statischen Eigenschaften auch Brucheigenschaften und Ermüdungseigenschaften in das Design einfließen. Die Erhöhung der Festigkeit einer Legierung darf die sekundären Eigenschaften wie Bruchzähigkeit, Ermüdungsrissausbreitungsgeschwindigkeit oder das Korrosionsverhalten nicht zu stark beeinträchtigen.

Jede Legierungsentwicklung hat also zum Ziel, die vielfältigen Eigenschaften zu verbessern, welche teilweise untereinander abhängig sind, ohne dass eine Eigenschaft nennenswert leidet. Dies hat einen hohen Entwicklungsaufwand mit kosten- und zeitintensiven Prüfungen zur Folge.

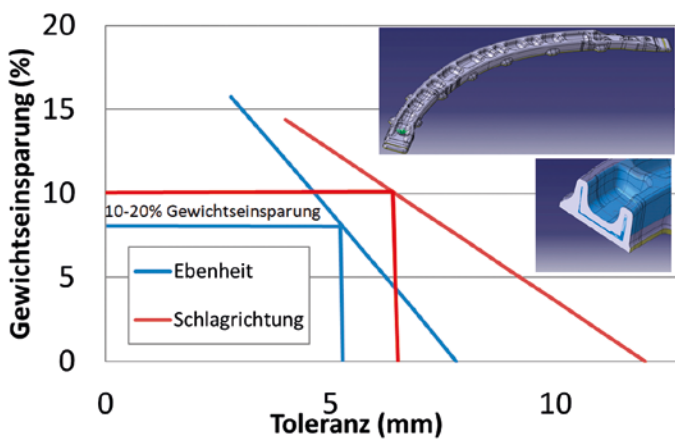
Alle hochfesten Aluminiumlegierungen weisen anisotrope Eigenschaften auf, das heißt infolge des Presseffekts [7] sind viele Eigenschaften abhängig vom lokalen Faserverlauf, insbesondere die Festigkeitswerte, die Bruchzähigkeit und die Ermüdungsrissausbreitung. Wenn es gelingt, die lokalen Abkühlgeschwindigkeiten beim Abschrecken eines Gesenkschmie-

details zu simulieren, kann man die lokalen mechanischen Bauteileigenschaften vorausberechnen. Gleichzeitig ermöglichen moderne Schmiedesimulationen die Darstellung eines dreidimensionalen Faserverlaufs, wodurch die Richtungsabhängigkeit der Eigenschaft berücksichtigt werden kann. Bild 9 zeigt eine Prozesskettensimulation für ein geschmiedetes Al-Integralbauteil. Die Kopplung der einzelnen Simulationstools ist ein Ziel künftiger Entwicklungsprojekte.

SCHMIEDEAGGREGATE FÜR INTEGRALBAUTEILE

Aufgrund der hohen Investitionskosten plant man, eine Großpresse möglichst universell einzusetzen, sodass auf dem gleichen Aggregat neben Aluminiumlegierungen auch Titan- und Nickelwerkstoffe verarbeitet werden.

Hydraulische Pressen sind aufgrund ihrer universellen Regelbarkeit für die unterschiedlichen Aufgaben deutlich besser geeignet als Spindelpressen oder Hämmer. Aus diesem Grund hat die Otto Fuchs-Gruppe bei ihrem Tochterunternehmen Weber Metals in Los Angeles eine neue Großpresse mit einer Presskraft von 540 MN (entspricht etwa 60.000 US-t) errichtet: Amerikas größte Schmiedepresse ist auch die weltweit größte Unterflurpresse und zugleich die größte jemals privat finanzierte Presse (Bild 10). Sie ging im Oktober 2018 in Betrieb.



Die höhere Steifigkeit der Presse, die größere Kraft und die verbesserte Regelgenauigkeit erlauben die Herstellung größerer Gesenkschmiedeteile mit engeren Toleranzen. Dies verbessert die Reproduzierbarkeit in der Produktion und senkt den Materialeinsatz und nachfolgend die Zerspanungskosten.

Bild 11 zeigt das Rechenbeispiel für ein großes Titan-Integralbauteil: Die Einschränkung der üblichen Fertigungstoleranzen um etwa ein Drittel führt zu einer Reduzierung des Bauteilgewichts um 10 bis 20 Prozent – erste Erfahrungen mit der neuen Presse bestätigen diese Berechnung.

Bild 11: Einfluss der Toleranzen auf die Gewichtseinsparung
nicht gesondert gekennzeichnete Bilder: Autoren



[1] Bölkow, L.: Ein Jahrhundert Flugzeuge: Geschichte und Technik des Fliegens; VDI-Verlag (1990)

[2] Metallwerke Otto Fuchs: Konstruieren mit Leichtmetall, Grundlagen der konstruktiven Gestaltung hochbeanspruchter Leichtmetall-Bauteile; Technischer Verlag Günter Grossmann (1966)

[3] Welsch, K.: Partielles Schmieden von Bauteilen mit flächiger Grundform; Umformtechnische Schriften Band 18, Verlag Stahleisen mbH (1989)

[4] Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS); Battelle Memorial Institute

[5] Starink, M. J.; Milkereit, B.; Zhang, Y.; Rometsch, P.A.: Predicting the quench sensitivity of Al-Zn-Mg-Cu alloys: A model for linear cooling and strengthening; Materials and Design 88 (2015), pp. 958 – 971

[6] Holroyd, N. J. H: Environment-Induced Cracking of High-Strength, Aluminium Alloys, EICM Proceedings (2018), pp. 311 – 345

[7] Altenpohl, D.: Aluminium und Aluminium-Legierungen; Springer-Verlag (1965); 554, 599