





دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

عنوان پایان نامه / رساله (پارسا)

پایان نامه کارشناسی ارشد (رساله دکتری) مهندسی مواد و متالورژی

نام دانشجو

استاد (اساتید) راهنما:

دکتر ...

اساتید (استاد) مشاور:

دکتر ...

دکتر ..

بهار ۱۴۰۳



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد (رساله دکتری مهندسی مواد و متالورژی آقای (خانم) ...

تحت عنوان

عنوان

در تاریخ ۱۴۰۳/۳/۲۲ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر

استاد راهنمای اول

دکتر

استاد راهنمای دوم

دکتر

استاد مشاور

دکتر

استاد داور

دکتر

استاد داور (خارجی)

دکتر

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

به نام آن که جان را فکرت آموخت

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد. سپاس او را که نعمت ولایت اهل بیت علیهم السلام را بر ما ارزانی داشت، به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت.

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نسیم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسیم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم.

از استاد فاضل و گرانقدر، جناب آقای دکتر ... که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی و دقت و دانش تحسین برانگیز از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند، کمال تشکر را دارم و افتخار شاگردی ایشان را تا همیشه با خود نگاه خواهم داشت. از استاد صبور و اندیشمند، جناب آقای دکتر ... که زحمت مشاوره این رساله را تقبل نمودند و انتفاع از دریای دانش خود را بر بنده دریغ نمودند تشکر میکنم.

از اساتید محترم جناب آقای دکتر ...، جناب آقای دکتر ... و جناب آقای دکتر ... که زحمت بازخوانی و داوری این رساله را بر عهده داشتند کمال تشکر را دارم.

در نهایت، از کلیه کارکنان دانشکده مهندسی مواد و دوستانی که هر کدام به نحوی در تهیه این مجموعه با این جانب همکاری داشته‌اند تشکر نموده و موفقیت همه آنها را از خداوند متعال خواهانم.

نام و نام خانوادگی

بهار ۱۴۰۴

کلیه حقوق مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق
موضوع این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی
اصفهان است.

تقديم به

.....

.....

.....

فهرست مطالب

فهرست مطالب	هفت
فهرست اشکال	نه
فهرست جداول	دوازده
چکیده	۱
فصل اول مقدمه	۲
فصل دوم مروری بر مطالب	۴
۱-۲ بخش اول	۴
۱-۲-۱ زیربخش اول	۵
۱-۲-۲ زیر بخش دوم	۶
۱-۲-۳ زیربخش سوم	۶
۲-۲ زیر فصل دوم	۷
۳-۲ جمع بندی و هدف پژوهش	۸
فصل سوم مواد و روش آزمون	۹
۱-۳ مواد	۹
۲-۳ تولید نمونه ها	۱۰
۳-۳ مشخصه یابی ساختاری	۱۰
۴-۳ شبیه سازی	۱۰
فصل چهارم نتایج و بحث	۱۲
۱-۴ زیر فصل اول	۱۲
۱-۴-۱ زیربخش اول از زیر فصل اول	۱۲
۱-۴-۲ زیربخش دوم از زیر فصل اول	۱۳
۲-۴ زیر فصل دوم	۱۳
۱-۲-۴ زیربخش اول از زیر فصل دوم	۱۳
فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات	۱۴

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲. نمودار بازار جهانی فناوری ساخت افزایشی به تفکیک زمینه کاربرد در سال ۲۰۱۷ [۲] ۵
- شکل ۲-۲. نمودار پیش‌بینی مزایای ساخت افزایشی در صنعت هوا فضا تا سال ۲۰۲۵ میلادی [۲] ۵
- شکل ۵-۲. طرح‌واره فرایند EBM [۳] **Error! Bookmark not defined.**
- شکل ۶-۲. تاثیر توان و سرعت لیزر بر ریزساختار آلیاژ $Fe-Si-B-Cu-Nb$ [۴] ۷
- شکل ۱۰-۲: الف و ب) **Error! Bookmark not defined.**
- شکل ۱-۴. زیرنویس شکل ۱۲

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲. عنوان جدول به همراه مرجع آن [۴].....	۶
جدول ۱-۳. تنظیمات مورد استفاده برای انجام آزمون <i>XRD</i> با دستگاه <i>Malvern PANalytical</i>	۱۰
جدول ۱-۴. بالانویس جدول.....	۱۳

حکیدہ

[illegible]

کلمات کلیدی: ساخت افزایشی، ذوب بستر پودر یا لیزر، آلیاژسازی درجا، انجماد سریع، تتانیوم، معادله تحلیلی روزنتال.

فصل اول

مقدمه

روش ساخت افزایشی^۱ که در آن قطعات به صورت لایه به لایه و بر اساس طرح‌های سه بعدی رایانه‌ای ایجاد می‌شوند، از جمله روش‌های نوپهوری است که ضمن داشتن سرعت بالا، تولید قطعات با کیفیت بالا و با هندسه پیچیده را ممکن می‌سازد. امروزه ساخت افزایشی قطعاتی از جنس انواع پلیمر، فلز، سرامیک و بتن امکان‌پذیر شده است. روش ذوب بستر پودر (PBF)^۲ و نشست هدایت شده انرژی (DED)^۳، دو روش پرکاربرد جهت ساخت افزایشی قطعات فلزی هستند.

روش ساخت افزایشی^۴ که در آن قطعات به صورت لایه به لایه و بر اساس طرح‌های سه بعدی رایانه‌ای ایجاد می‌شوند، از جمله روش‌های نوپهوری است که ضمن داشتن سرعت بالا، تولید قطعات با کیفیت بالا و با هندسه پیچیده را ممکن می‌سازد. امروزه ساخت افزایشی قطعاتی از جنس انواع پلیمر، فلز، سرامیک و بتن امکان‌پذیر شده است. روش ذوب بستر پودر (PBF)^۵ و نشست هدایت شده انرژی (DED)^۶، دو روش پرکاربرد جهت ساخت افزایشی قطعات فلزی هستند.

روش ساخت افزایشی^۷ که در آن قطعات به صورت لایه به لایه و بر اساس طرح‌های سه بعدی رایانه‌ای ایجاد

¹ Additive Manufacturing (AM)

² Powder Bed Fusion (PBF)

³ Directed Energy Deposition (DED)

⁴ Additive Manufacturing (AM)

⁵ Powder Bed Fusion (PBF)

⁶ Directed Energy Deposition (DED)

⁷ Additive Manufacturing (AM)

می‌شوند، از جمله روش‌های نوظهوری است که ضمن داشتن سرعت بالا، تولید قطعات با کیفیت بالا و با هندسه پیچیده را ممکن می‌سازد. امروزه ساخت افزایشی قطعاتی از جنس انواع پلیمر، فلز، سرامیک و بتن امکان‌پذیر شده است. روش ذوب بستر پودر (PBF)^۱ و نشست هدایت شده انرژی (DED)^۲، دو روش پرکاربرد جهت ساخت افزایشی قطعات فلزی هستند.

^۱ Powder Bed Fusion (PBF)

^۲ Directed Energy Deposition (DED)

فصل دوم

مروری بر مطالب

۱-۲ بخش اول

روش‌های ساخت افزایشی به فرایندهای اتصال لایه لایه مواد به یکدیگر بر اساس یک مدل سه بعدی گفته می‌شود. این روش‌ها را می‌توان در مقابل روش‌های ساخت کاهشی^۱، که در آن‌ها شکل نهایی قطعه با حذف قسمت‌های اضافی یک ماده اولیه ایجاد می‌شود، در نظر گرفت [۱].

استفاده از روش‌های ساخت افزایشی در سال‌های اخیر گسترش چشمگیری داشته و از آن‌ها در ساخت قطعاتی از جنس پلیمر، فلز، سرامیک و بتن استفاده می‌شود. نمودار بازار جهانی فناوری ساخت افزایشی در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. بر اساس این نمودار، صنایع حمل و نقل، الکترونیک و هوافضا جزو صنایع پیشرو استفاده کننده از این فناوری محسوب می‌شوند. در شکل ۲-۲ مزایای استفاده از ساخت افزایشی در صنعت هوافضا تا سال ۲۰۲۵ به صورت پیش بینی ارائه شده است.

¹ Subtractive Manufacturing (SM)

Figure 1 consists of two plots showing the evolution of lattice parameters over time (0 to 5000 s).

The left plot shows the ratio c/a (Y-axis, ranging from 1.001 to 1.008) versus Time [s] (X-axis, logarithmic scale from 5 to 5000). The data points (blue circles) show a sharp decrease in c/a from approximately 1.0075 at 5 s to about 1.0020 at 100 s, followed by a gradual decrease to approximately 1.0018 at 5000 s.

The right plot shows the Lattice parameter [Å] (Y-axis, ranging from 2.86 to 2.89) versus Time [s] (X-axis, logarithmic scale from 5 to 5000). Two data series are plotted: c (blue circles) and a (black circles). The c parameter decreases from approximately 2.885 Å at 5 s to about 2.869 Å at 5000 s. The a parameter decreases from approximately 2.864 Å at 5 s to about 2.864 Å at 5000 s, showing a slight initial increase before stabilizing.

۲-۱-۱ زیربخش اول

زیر بخش اول زیر بخش اول زیر بخش اول زیر بخش اول زیر بخش اول
اول زیر بخش اول زیر بخش اول زیر بخش اول زیر بخش اول زیر بخش اول
بخش اول زیر بخش اول زیر بخش اول زیر بخش اول زیر بخش اول
زیر بخش اول زیر بخش اول زیر بخش اول زیر بخش اول زیر بخش اول
اول زیر بخش اول زیر بخش اول زیر بخش اول زیر بخش اول زیر بخش اول
بخش اول زیر بخش اول زیر بخش اول

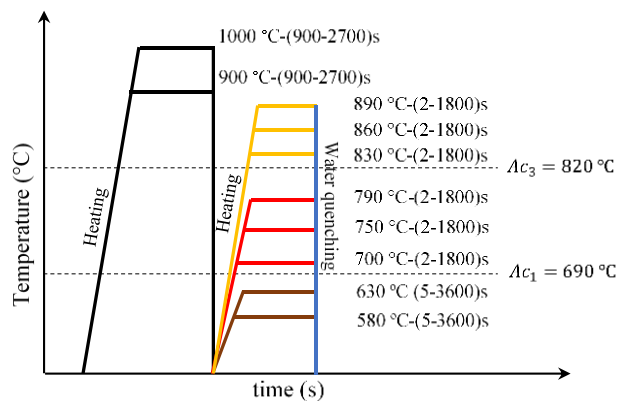
عنوان فرعی زیربخش سوم عنوان فرعی زیربخش سوم عنوان فرعی زیربخش سوم عنوان فرعی زیربخش سوم (شکل ۳-۲) عنوان فرعی زیربخش سوم عنوان فرعی زیربخش سوم عنوان فرعی زیربخش سوم عنوان فرعی زیربخش سوم

۳-۲ جمع‌بندی و هدف پژوهش

جمع‌بندی و هدف پژوهش جمع‌بندی و هدف پژوهش جمع‌بندی و هدف پژوهش جمع
 بندی و هدف پژوهش جمع‌بندی و هدف پژوهش جمع‌بندی و هدف پژوهش جمع‌بندی
 و هدف پژوهش

مواد و روش آزمون

۱-۳ مواد

[illegible]

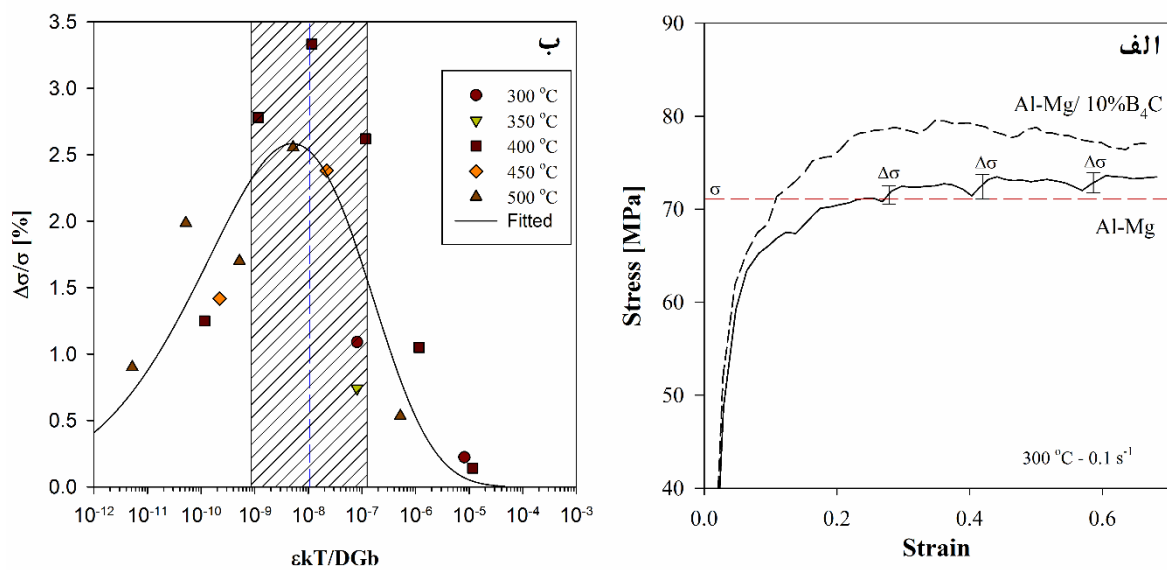
شکل ۳-۱. شماتیک سیکل الف) آنیل زیر بحرانی، ب) آنیل میان بحرانی، ج) آنیل فرا بحرانی.

فصل چهارم

نتایج و بحث

۱-۴ زیرفصل اول

۱-۱-۴ زیربخش اول از زیرفصل اول



شکل ۱-۴. زیرنویس شکل، الف، و ب).

- پیش نهادات پیش نهادات پیش نهادات

- [1] Frazier, W.E., "Metal additive manufacturing: A review", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, No. 6, pp. 1917–1928, 2014.
- [2] Altıparmak, S.C., Xiao, B., "A market assessment of additive manufacturing potential for the aerospace industry", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 68, pp. 728–738, 2021.
- [3] Galati, M., Iuliano, L., "A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations", *Additive Manufacturing*, Vol. 19, pp. 1–20, 2018.
- [4] Conteri, R., Borkar, T., Nag, S., Jaeger, D., Chen, X., Ramanujan, R. V., Banerjee, R., "Laser additive processing of Fe-Si-B-Cu-Nb magnetic alloys", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 29, pp. 175–181, 2017.

Title Tile Title Tile Title Tile Title Tile Title Tile

Student name and family name

mail address@ma.iut.ac.ir

12nd June 2022

Department of Materials Engineering

Isfahan University of Technology, 84156-83111, Isfahan, Iran

Abstract

Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract
Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract
Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract
Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract
Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract	Abstract
Abstract	Abstract	Abstract	Abstract								

Keywords

Additive Manufacturing, Laser Powder Bed Fusion, In-situ alloying, Rapid solidification, Titanium, Rosenthal analytical solution.



Isfahan University of Technology
Department of Materials Engineering

Title

A Thesis
Submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of **Doctor of Philosophy (Master of Science)**

By

Student

Evaluated and approved by the thesis committee, on **June 12, 2022**:

- 1- Dr..., Prof (Supervior)
- 2- Dr..., Assoc. Prof (Advisor)
- 3- Dr..., Assoc. Prof (Advisor)
- 4- Dr..., Prof (Examiner)
- 5- Dr..., Assoc. Prof (Examiner)
- 6- Dr....., Asst. Prof. (Examiner)

Department Graduate Program Coordinator, **Dr Asst Prof.**