

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

LEONARDO SHOJI AOTA

Microstructure of AISI 316L austenitic stainless steel processed by laser powder-bed fusion with different scanning strategies and its evolution upon annealing and thermomechanical processing

Microestrutura do aço inoxidável austenítico 316L processado via fusão a *laser* em leito de pó com diferentes estratégias de escaneamento e a sua evolução após recozimento e processamento termomecânico

Lorena

2021

LEONARDO SHOJI AOTA

Microstructure of AISI 316L austenitic stainless steel processed by laser powder-bed fusion with different scanning strategies and its evolution upon annealing and thermomechanical processing

Dissertation presented to the Escola de Engenharia de Lorena of Universidade de São Paulo to obtain the title of Master of Science from the Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais in the field of Advanced and Conventional Materials.

Advisor: Prof. Dr. Hugo R. Z. Sandim

Revised version

Lorena
2021

NÃO AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, SERÁ DISPONIBILIZADO AUTOMATICAMENTE APÓS 2 ANOS DA PUBLICAÇÃO

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Aota, Leonardo Shoji
Microstructure of AISI 316L austenitic stainless steel processed by laser powder-bed fusion with different scanning strategies and its evolution upon annealing and thermomechanical processing / Leonardo Shoji Aota; orientador Hugo Ricardo Zschommler Sandim - Versão Corrigida. - Lorena, 2021.
140 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais na Área de Materiais Convencionais e Avançados) - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo.
2021

1. Additive manufacturing. 2. Recrystallization. 3. Microstructural evolution. 4. Plastic deformation. 5. Aisi 316l austenitic stainless steel. I. Título. II. Sandim, Hugo Ricardo Zschommler, orient.

LEONARDO SHOJI AOTA

Microestrutura do aço inoxidável austenítico 316L processado via fusão a *laser* em leito de pó com diferentes estratégias de escaneamento e a sua evolução após recozimento e processamento termomecânico

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais na área de Materiais Convencionais e Avançados.

Orientador: Prof. Dr. Hugo R. Z. Sandim

Versão Corrigida

Lorena

2021

NÃO AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, SERÁ DISPONIBILIZADO AUTOMATICAMENTE APÓS 2 ANOS DA PUBLICAÇÃO

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Aota, Leonardo Shoji
Microstructure of AISI 316L austenitic stainless steel processed by laser powder-bed fusion with different scanning strategies and its evolution upon annealing and thermomechanical processing / Leonardo Shoji Aota; orientador Hugo Ricardo Zschommler Sandim - Versão Corrigida. - Lorena, 2021.
140 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais na Área de Materiais Convencionais e Avançados) - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo.
2021

1. Additive manufacturing. 2. Recrystallization. 3. Microstructural evolution. 4. Plastic deformation. 5. Aisi 316l austenitic stainless steel. I. Título. II. Sandim, Hugo Ricardo Zschommler, orient.

To all educators and researchers for their effort in providing knowledge and, consequently, changing the World into a better place.

Acknowledgments

To FAPESP for the financial support provided through both the Master (Grant 2018/23582-9) and Research Internship Abroad (Grant 2019/19942-0) scholarships;

To Prof. Dr. Hugo Ricardo Zschommler Sandim for the valuable discussions and academic orientations throughout this work;

To Prof. Dr.-Ing. habil. Dierk Raabe from Max-Planck-Institut für Eisenforschung (MPIE) for the opportunity of performing a research internship and for the valuable discussions and advices during my stay;

To Prof. Dr. Kahl Dick Zilnyk for the valuable discussions and advices, as well as for the aid in obtaining scanning electron microscopy images at the Instituto Tecnológico Aeronáutico (ITA);

To Dr. Isnaldi Rodrigues de Souza Filho (MPIE) for the valuable discussions, as well as for the support during my stay at the MPIE, and for the initial EBSD measurement and ECCI images;

To Dr. Cauê Corrêa da Silva for the kind help in performing extra EBSD measurements and for the support during my stay at the MPIE;

To Monika Nellessen, Katja Angenendt, Christian Bross and Heidi Bögershausen for their kind assistance in metallography- and scanning electron microscopy-related techniques at MPIE;

To Prof. Dr. rer. nat Eric Aime Jäggle (MPIE) and Dr. Priyanshu Bajaj (MPIE) for processing the material used in this study;

To Dr. Zhongji Sun, Dr. Supriya Nandy, and Dr. Stefan Zaefferer for their kind help in performing cross correlation (CC-EBSD) measurements and ECCI images;

To Prof. Dr. Haroldo Cavalcanti Pinto (EESC-USP), Dr. Alberto Cury Nassour (EESC-USP) and Dr. Benjamin Breitbach (MPIE) for their kind help on XRD and residual stresses measurements;

To PPGEM and EEL-USP employees for their support during my studies and the experimental measurements;

To Mr. Ronildson Monteiro da Aparam South América (Timóteo – MG) for providing the chemical composition analyses in this material;

To my family and friends for their unconditional support.

*“Educar é crescer. E crescer é viver.
Educação é, assim, vida no sentido mais
autêntico da palavra.”*

Anísio Teixeira

ABSTRACT

AOTA, L. S. Microstructure of AISI 316L austenitic stainless steel processed by laser powder-bed fusion with different scanning strategies and its evolution upon annealing and thermomechanical processing. 2021. 140 p. Dissertation (Master of Science) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2021.

Metallic materials processed by laser powder-bed fusion (LPBF) have unique microstructures inherited from out-of-equilibrium solidification and complex thermal history. This work reports the possibility of changing the microstructure during LPBF and post-processing of 316L stainless steel. By controlling the process parameters, namely the scanning strategy, we demonstrate the possibility of creating patterned microstructures in this steel. Changing the scanning strategy also affects the residual stresses as well as the defect substructure caused by the high cooling rates. We explore the microstructure/residual stresses relationship to find alternatives to reduce the residual stresses by controlling the microstructure. Upon post-processing annealing, recrystallization nucleation occurs in a non-uniform manner throughout the patterned microstructure, allowing for a linear grain impingement in its early stages, as revealed by applying the microstructural path method (MPM). The active recrystallization mechanisms are revealed and their influence on the non-homogeneous nucleation and recrystallization kinetics is discussed, as well as the possibility of creating engineered microstructures by LPBF processing. Recrystallization nuclei number density is the main factor responsible for the difference in the recrystallization kinetics between different scanning strategies, while particle pinning is responsible for a sluggish kinetics in both cases. The unique microstructures produced by LPBF were cold rolled down to $\epsilon = 1$, resulting in intense twinning and shear banding. The latter is unusual for such strain in wrought-processed austenitic stainless steels. Upon annealing, the cold-rolled samples show abnormal grain growth, while this phenomenon is absent when annealing is applied directly after LPBF. Abnormal grain growth is triggered by an initial size advantage for $\langle 110 \rangle \parallel \text{ND}$ grains along particle-depleted regions. These findings allow us for gaining insight on the control of LPBF-processed microstructures through LPBF-processing and post-processing.

Keywords: Additive manufacturing. Recrystallization. Microstructural evolution. Plastic deformation. AISI 316L austenitic stainless steel.

RESUMO

AOTA, L. S. Microestrutura do aço inoxidável austenítico 316L processado via fusão a laser em leito de pó com diferentes estratégias de escaneamento e a sua evolução após recozimento e processamento termomecânico. 2021. 140 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2021.

Materiais metálicos processados por fusão a laser em leito de pó (LPBF) possuem microestruturas únicas obtidas pela rápida solidificação e história térmica complexa. Este trabalho reporta a possibilidade de mudar a microestrutura durante LPBF e pós-processamento de um aço inoxidável 316L. Controlando a estratégia de escaneamento, demonstramos a possibilidade de criar microestruturas padronizadas neste aço. A estratégia de escaneamento altera as tensões residuais e a subestrutura de defeitos causadas pelas altas taxas de resfriamento. Nós exploramos a relação entre microestrutura e tensões residuais a fim de encontrar alternativas de reduzir as tensões residuais por meio do controle microestrutural na condição como processado. Após recozimento, a nucleação da recristalização ocorre de maneira não uniforme ao longo da microestrutura padronizada, obtendo-se um *clusters* lineares de grão recristalizados durante os primeiros momentos, como demonstrado pelo método do caminho microestrutural (MPM). Os mecanismos de recristalização são revelados e a sua influência na nucleação não uniforme e na cinética de recristalização são discutidos, assim como a possibilidade de criar microestruturas engenheiradas por LPBF. A densidade superficial de grãos recristalizados é o principal fator responsável pela diferença na cinética de recristalização entre diferentes estratégias de escaneamento, enquanto o travamento de contornos por partículas é responsável pela cinética lenta de recristalização em ambos os casos. A microestrutura única produzida por LPBF foi submetida a laminação a frio ($\epsilon = 1$), resultando em intensa formação de maclas de deformação e bandas de cisalhamento. Durante o recozimento, as amostras laminadas a frio mostram crescimento anormal de grãos, provocado por uma vantagem inicial de tamanho de grãos $\langle 110 \rangle$ || ND em regiões pobres em partículas. Estes achados permitem o desenvolvimento no controle de microestruturas processadas por LPBF.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Recristalização. Evolução microestrutural. Deformação plástica. Aço inoxidável austenítico AISI 316L.