



ADVANCED DESIGN RULES FOR OPTIMAL DYNAMIC PROPERTIES of additive manufacturing products

A_MADAM

Snežana Ćirić Kostić

Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu Univerziteta u Kragujevcu

Sadržaj

- Osnovni podaci
- Plan istraživanja
- Izabrani rezultati
- Istraživački problemi

Projektna lična karta

OSNOVNI PODACI

Osnovni podaci

- Naziv projekta
 - „Napredna pravila projektovanja za optimalna dinamička svojstva proizvoda izrađenih aditivnim tehnologijama“
- Klasifikacija
 - Program: „Horizont 2020“ – H2020
 - Akcije „Marija Sklodovska Kiri“ – MSCA
 - Mehanizam: „Razmena istraživačkog i inovatorskog kadra“ – RISE
 - Poziv „RISE 2016“

Osnovni podaci

- Trajanje projekta
 - 1.1.2017 – 31.12.2020(1). (4-5 god.)
- Budžet projekta
 - 468.000 EUR
- Broj ugovora
 - 734455
- Skraćenica
 - A_MADAM

Cilj i zadaci projekta

- Cilj projekta
 - Utvrditi (neka od) ***pravila dizajna***
 - tako da, s obzirom na način proizvodnje,
 - ***proizvodi aditivnih tehnologija***
 - imaju ***optimalna dinamička svojstva***
- U ovom trenutku takva pravila ***ne postoje***
- Želimo da pomognemo projektantima proizvoda
- Glavni zadatak – javni digitalni repozitorijum
- Ne bavimo se poboljšanjem tehnologije!

Konzorcijum

- FMG Kraljevo – Univerzitet u Kragujevcu /Srbija/
- DIN – Univerzitet u Bolonji /Italija/
- Topomatika, Zagreb /Hrvatska/
- Studio Pedrini, Bolonja /Italija/
- Plamingo, Gračanica /Bosna i Hercegovina/



Šta i kako smo radili?

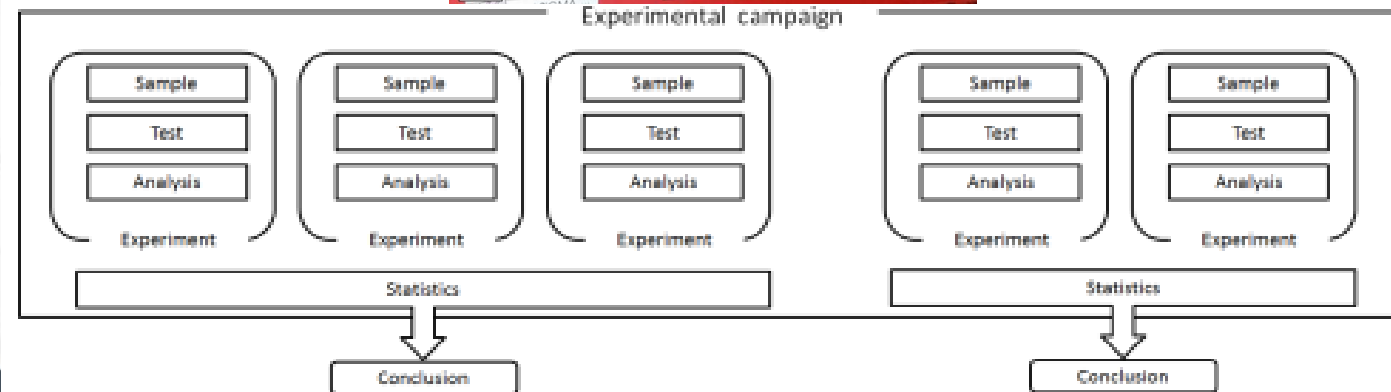
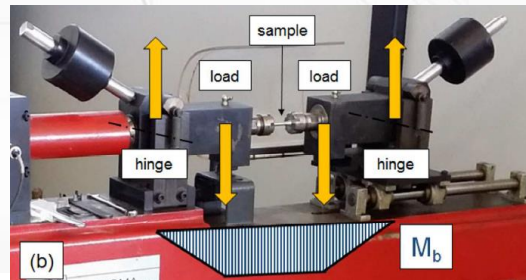
PLAN ISTRAŽIVANJA

Plan istraživanja

- Faktori koji su se istraživali
 - Materijal
 - Uslovi proizvodnje
 - Orijentacija
 - Položaj u proizvodnoj komori
 - Hibridna proizvodnja
 - Uslovi završne obrade
 - Termička obrada
 - Mašinska obrada
 - Peskarenje metalnom sačmom

Plan istraživanja

- Eksperiment
 - 15 uzoraka identičnog
 - Materijala
 - Oblika
 - Uslova proizvodnje
 - Završne obrade
 - Test
 - Analiza
- ANOVA statistika
 - Otkrivanje uticaja faktora koji se razlikuju



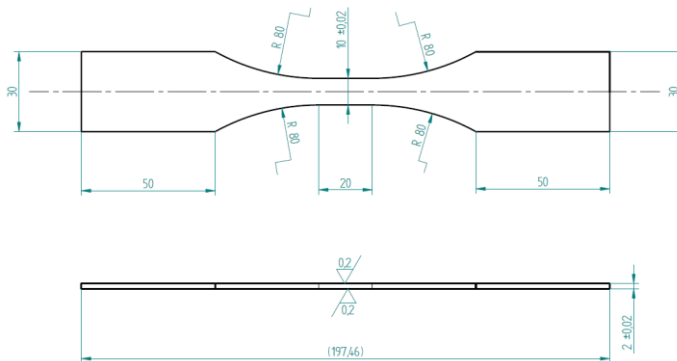
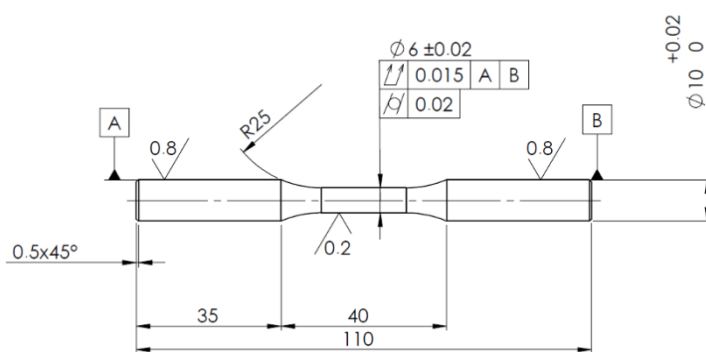
Plan istraživanja

- Istraživanje uticaja novih tehnologija
 - Uticaj slojevite strukture
 - Uticaj aditivnog principa formiranja sloja
- Standardne metodologije ispitivanja dinamičkog ponašanja
 - Standardni postupak
 - Standardni uzorci

Istraživanje zamora

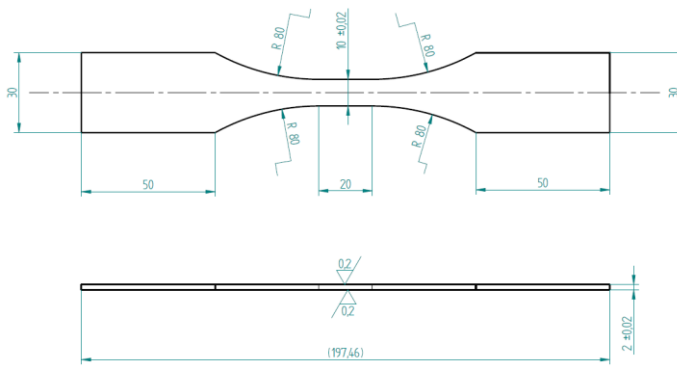
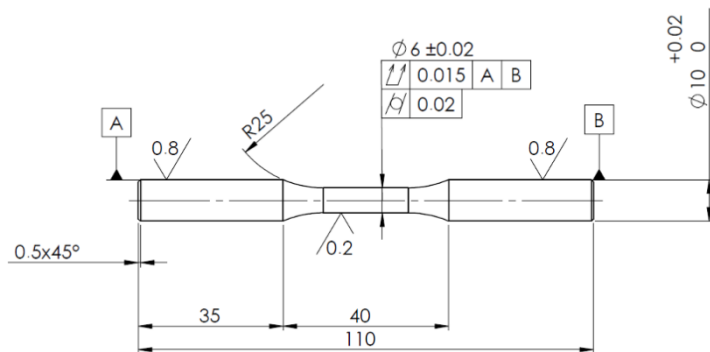
I. Standardi

- ISO 1143 (rotaciono savijanje)
- ISO 12107 (Velerova kriva),
Diksonov metod stepenica (određivanje σ_D)
- ASTM E466 (zatezanje)



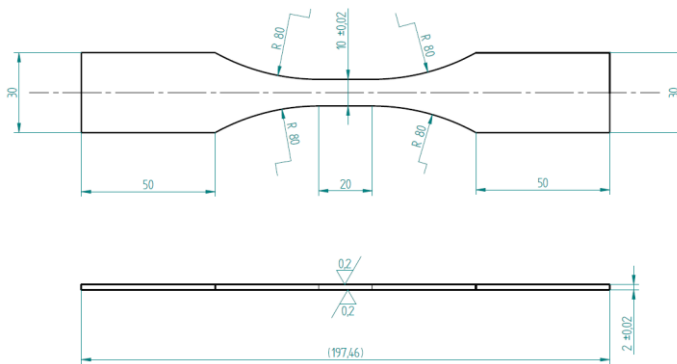
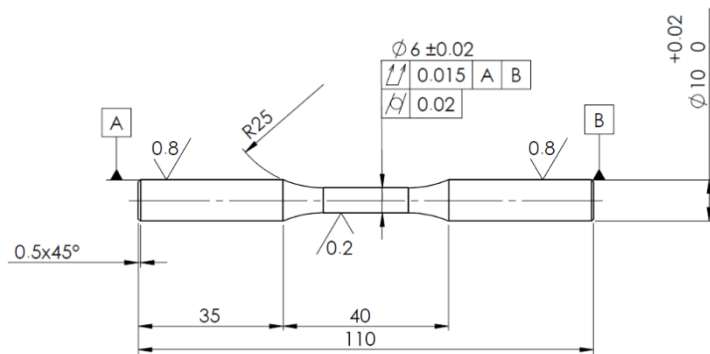
Istraživanje zamora

- Materijali
 - Alatni čelik EOS MS1 /1.2709/18 Mar 300/
 - Nerđajući čelik EOS PH1 /1.4540/15-5/
 - Specijalni alatni nerđajući čelik EOS CX



Istraživanje zamora

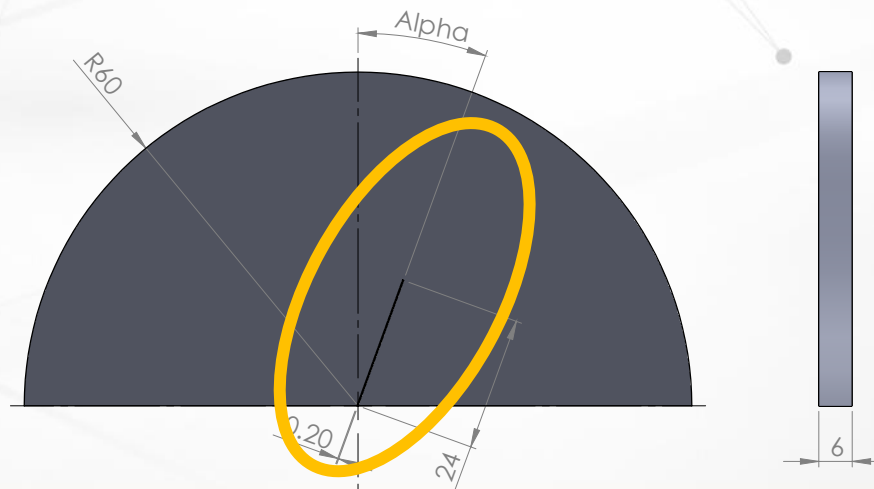
- Standardni uzorci od čelika
 - 45 eksperimenata
 - 654 uzorka
 - oko tri godine merenja na standardnoj aparaturi



Mehanika loma

II. Uzorci proizvedeni sa prslinom

- Materijali: EOS PA 3200 GF / HP 3D HR PA12 / EOS MS1
- Savijanje dejstvom u tri tačke
- 28 eksperimenata
- 128 uzoraka
- oko dve godine merenja na namenskoj aparaturi

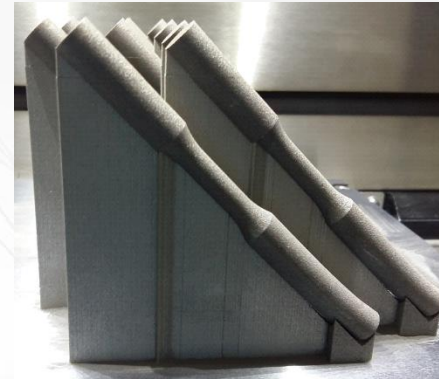


Uticaj orijentacije dela i dodatne obrade

IZABRANI REZULTATI

Ispitivanje zamora

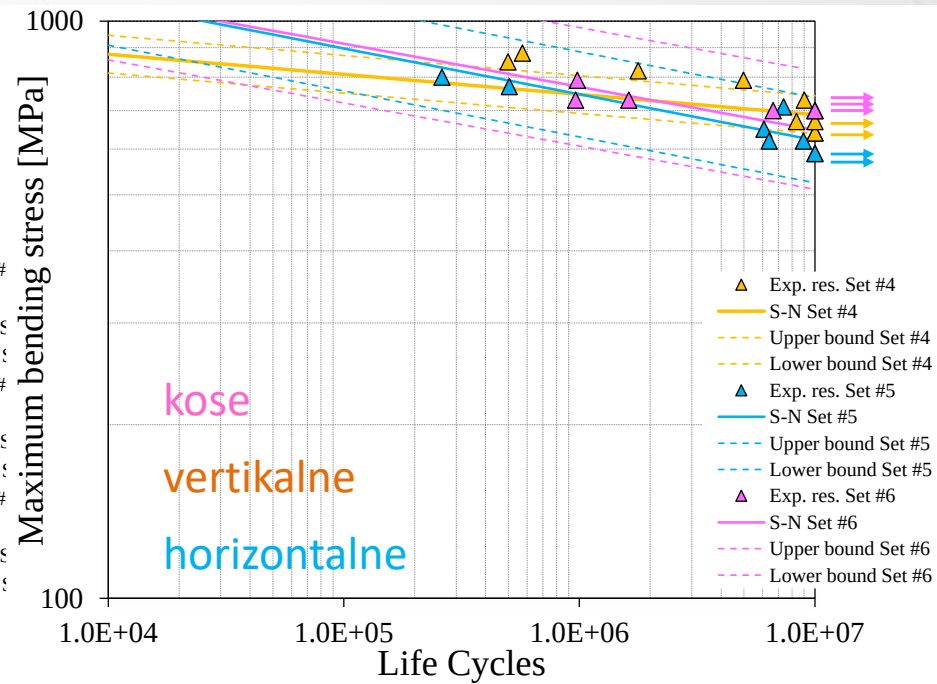
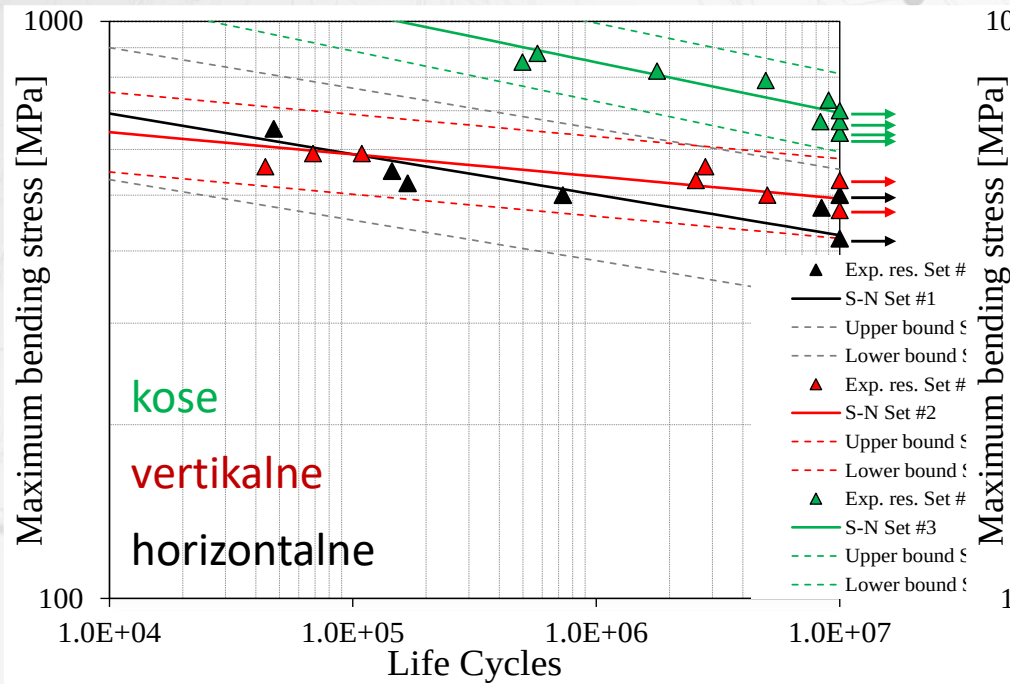
- Nerđajući čelik EOS PH1 –
Uticaj orijentacije i debljine dodatka za obradu
– Plan eksperimenta



		Debljina dodatka za obradu	
		1 mm	3 mm
Orijentacija	Horizontalna	Set #12 (H,1): 7 uzoraka	Set #15 (H,3): 9 uzoraka
	Vertikalna	Set #13 (V,1): 10 uzoraka	Set #16 (V,3): 10 uzoraka
	Kosa	Set #14 (S,1): 10 uzoraka	Set #17 (S,3): 9 uzoraka

Ispitivanja zamora

- Nerđajući čelik EOS PH1
 - Vremenska dinamička izdržljivost σ_N



Ispitivanja zamora

- Nerđajući čelik EOS PH1
 - Vremenska dinamička izdržljivost σ_N

horizontalne $\sigma_{12} = 1323 \cdot N^{-0.07}$

vertikalne $\sigma_{13} = 915 \cdot N^{-0.04}$

kose $\sigma_{14} = 2850 \cdot N^{-0.09}$

$\sigma_{15} = 1208 \cdot N^{-0.03}$

$\sigma_{16} = 2242 \cdot N^{-0.08}$

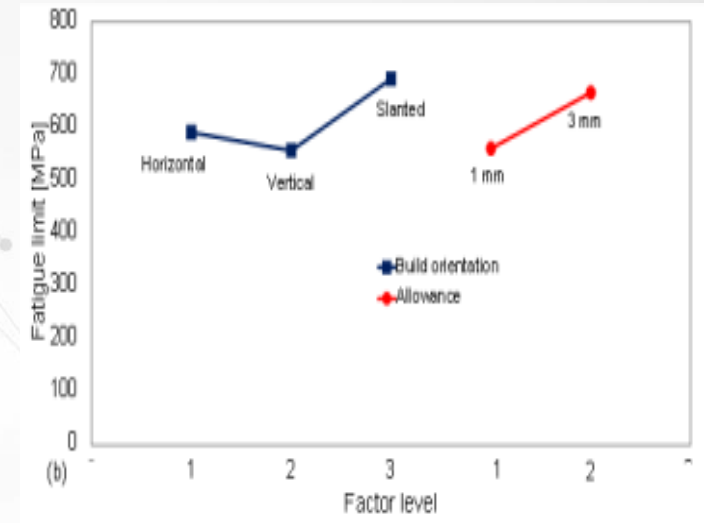
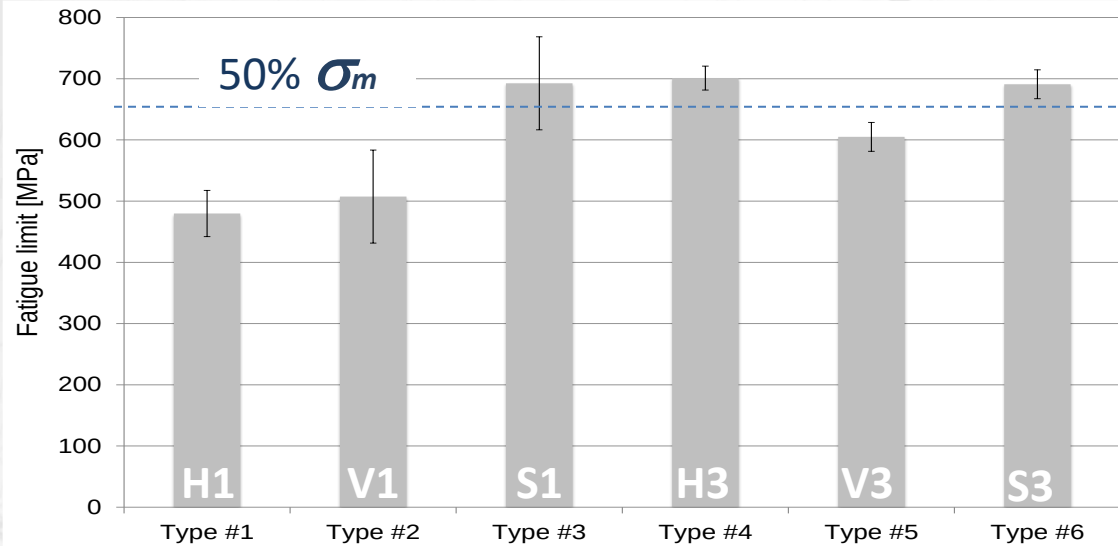
$\sigma_{17} = 2161 \cdot N^{-0.07}$

1 mm

3 mm

Ispitivanja zamora

- Nerđajući čelik EOS PH1
 - Trajna dinamička izdržljivost σ_D



- Vertikalne/horizontalne $\sigma_D \approx 37-39\% \sigma_m$
- Kose $\sigma_D \geq 50\% \sigma_m$

Ispitivanja zamora

- Nerđajući čelik EOS PH1
 - Trajna dinamička izdržljivost - ANOVA

3 orijentacije	<i>p</i>
Orijentacija	$4.0 \cdot 10^{-5}$
Debljina obrade	$3.1 \cdot 10^{-4}$
Interakcija	$3.4 \cdot 10^{-4}$

Horizontalno-Vertikalno	<i>p</i>
Orijentacija	0.45
Debljina obrade	$1.9 \cdot 10^{-5}$
Interakcija	0.22

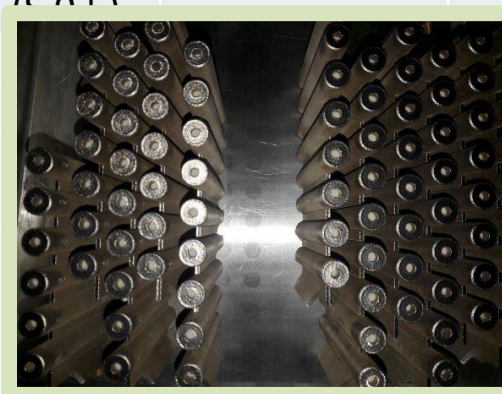
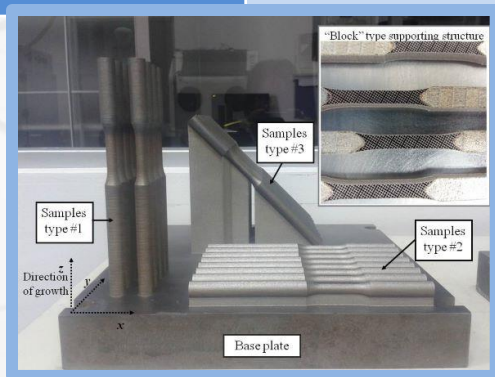
– Pravila dizajna

- Trajna dinamička izdržljivost proizvoda napravljenih od nerđajućeg čelika EOS PH1 tehnologijom DMLS
 - je najveća ako je pravac gradnje pod uglom od 45 stepeni u odnosu na pravac dinamičkog naprezanja
 - se povećava sa povećanjem debljine dodatka za naknadnu obradu rezanjem

Ispitivanja zamora

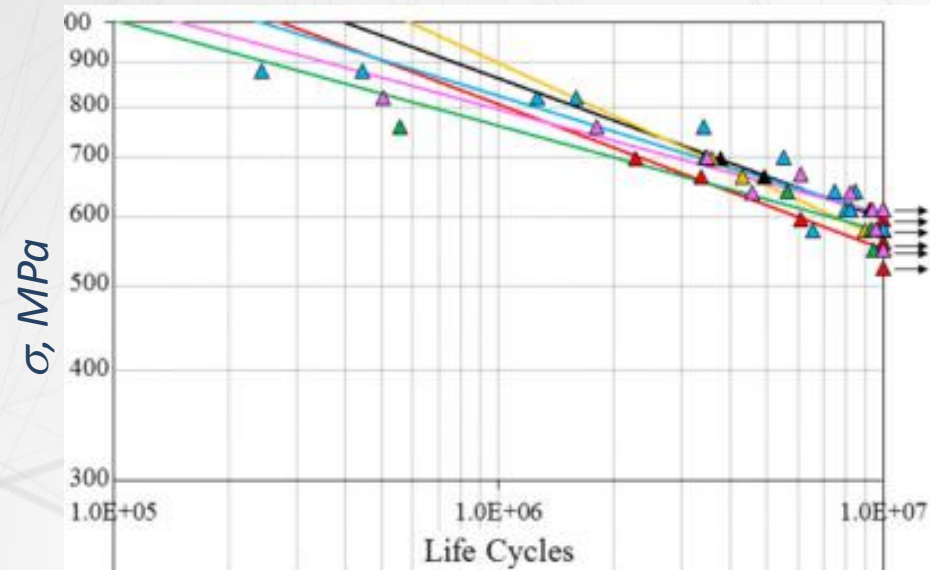
- Alatni čelik EOS MS1-
Uticaj orijentacije i debljine dodatka za obradu
– Plan eksperimenta

		Debljina obrade (mm)				
		0.5	1.0	2.0	3.0	4.0
Orijentacija	Horizontalna	Set #2 (H,0.5)			Set #5 (H,3)	
	Vertikalna	Set #1 (V,0.5)	Set #7 (V,1)	Set #8 (V,2)	Set #4 (V,3)	Set #9 (V,4)
	Kosa	Set #3 (S,0.5)			Set #6 (S,3)	

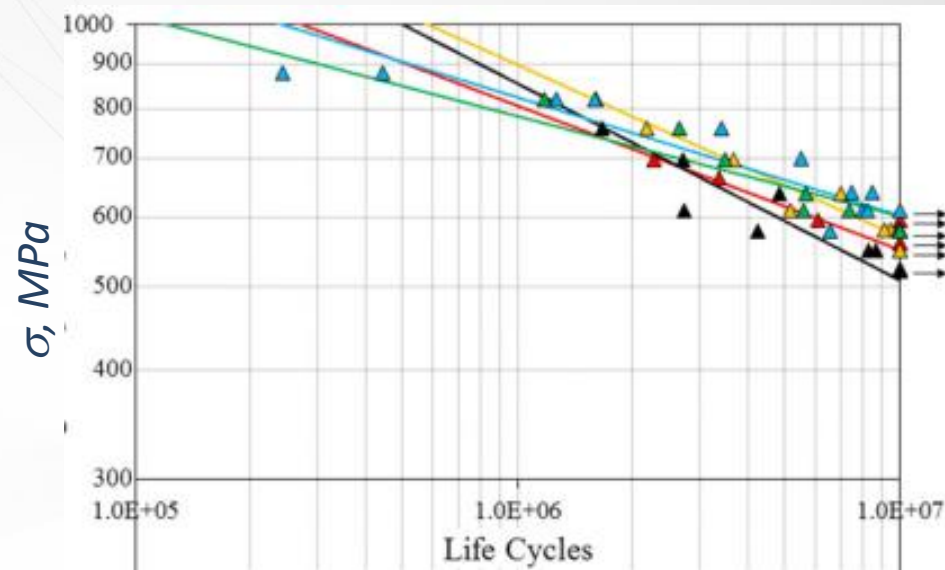


Ispitivanja zamora

- Alatni čelik EOS MS1
 - Vremenska izdržljivost σ_N



0,5 mm i 3 mm

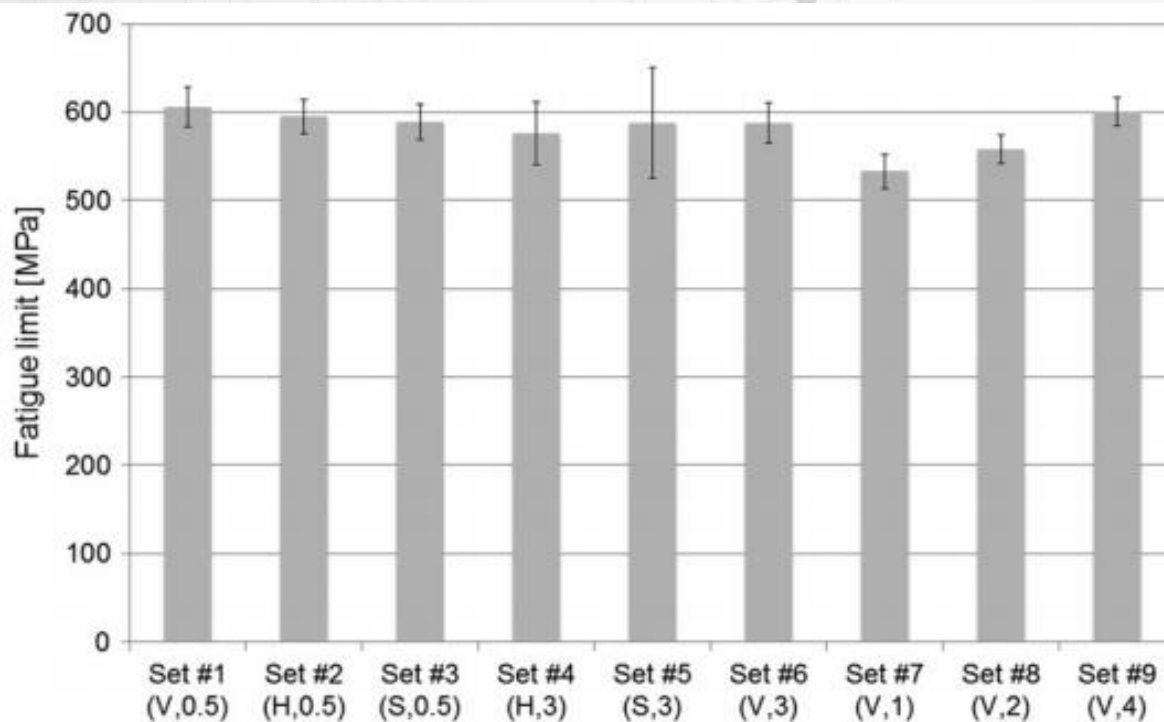


Vertikalne – sve debljine dodatka

Ispitivanja zamora



- Alatni čelik EOS MS1
 - Trajna dinamička izdržljivost σ_D (FL)



- $\sigma_D \approx 580 \text{ MPa} \approx 30\% \sigma_m$

Ispitivanja zamora

- Alatni čelik EOS MS1
 - Trajna dinamička izdržljivost - ANOVA

	p
Orijentacija	0,65
Debljina obrade	0,04
Interakcija	0,28

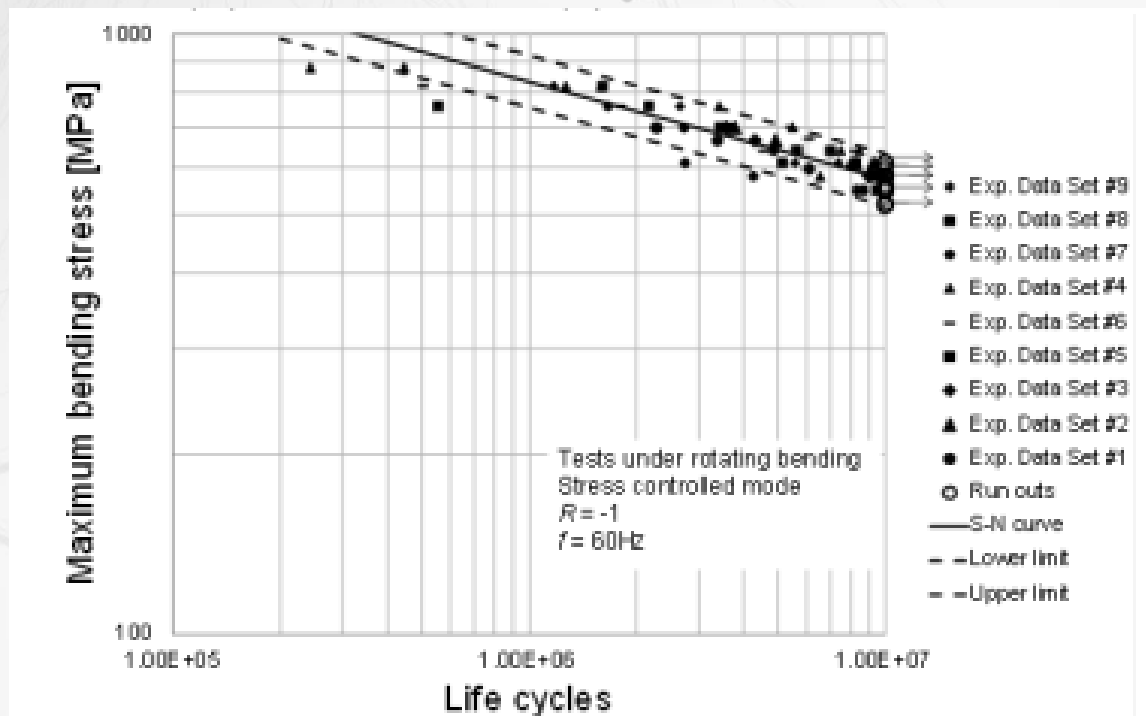
	p
Debljina obrade	0,19

Ispitivanja zamora

- Alatni čelik EOS MS1
 - Vremenska izdržljivost materijala

$$\sigma_N = 7940 N^{-0.163}$$

- 56 eksperimentalnih podataka!



$$PR=10\%$$

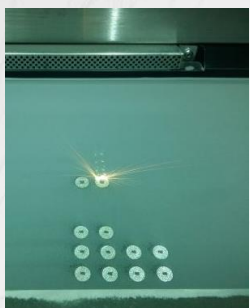
$$\sigma = 7191 \cdot N^{-0.163}$$

$$PR=90\%$$

$$\sigma = 8767 \cdot N^{-0.163}$$

Ispitivanja zamora

- Alatni čelik EOS MS1 - uticaj naknadne obrade
 - Plan eksperimenta



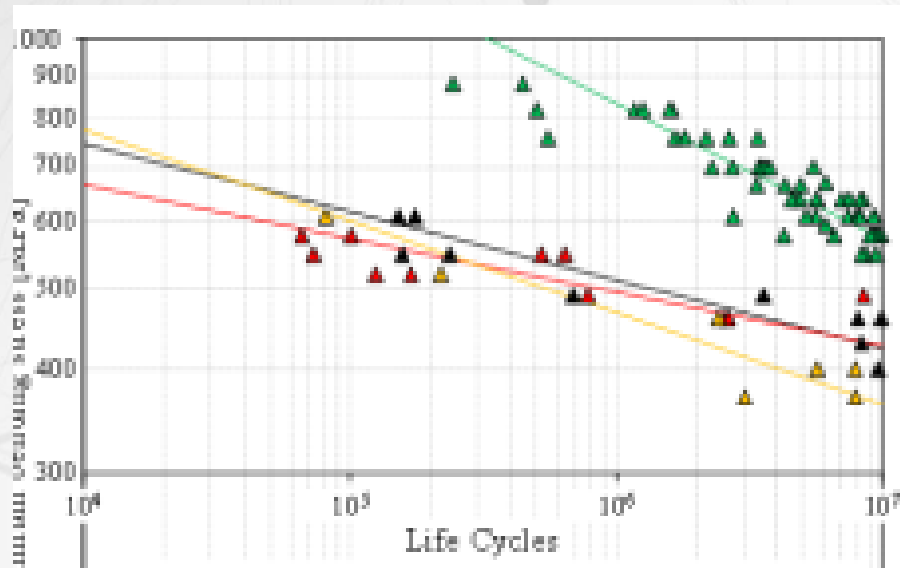
		Površinska obrada		
		Ne	Mašinska	Mašinska+peskarenje
Termička	Ne	Set #10 (as built)	Set #11	Set #19
	Da	Set #18	Set #1	



Ispitivanja zamora

- Alatni čelik EOS MS1 - uticaj naknadne obrade
 - Vremenska izdržljivost σ_N

Termička/Mašinska

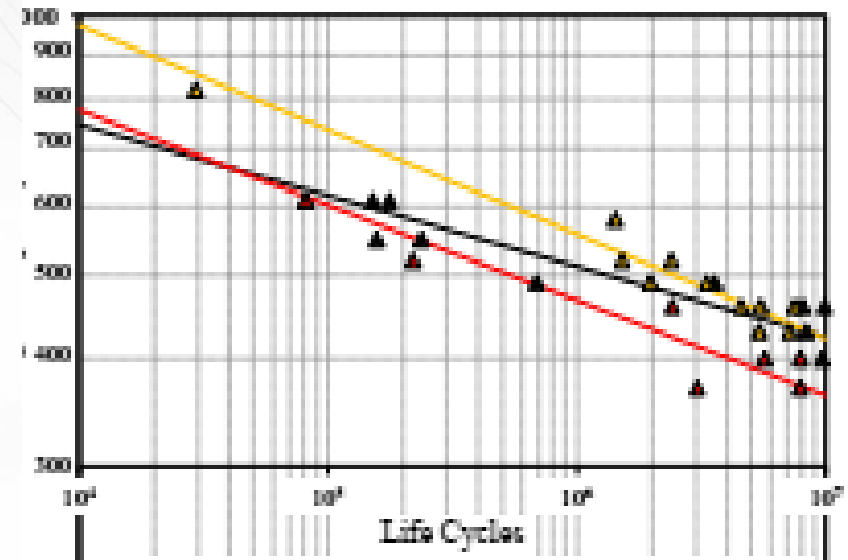


Set 1-termička i mašinska

Set 18-termička Set 11- mašinska

Set 1-bez obrade

Mašinska/Mašinska+Peskarenje



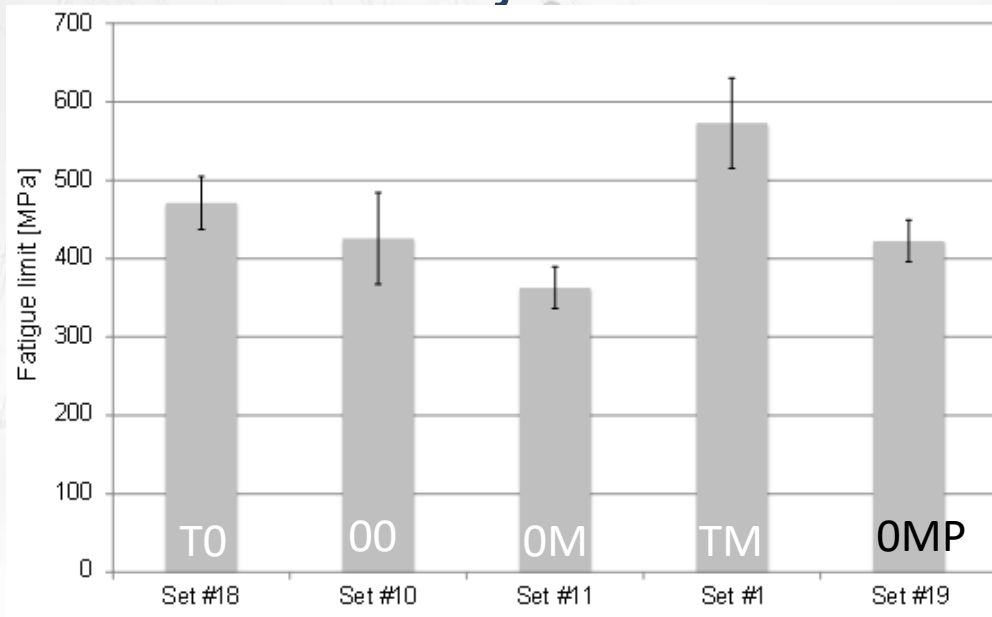
Set 19-mašinska+peskarenje

Set 11-mašinska

Set 10-bez obrade

Ispitivanja zamora

- Alatni čelik EOS MS1 - uticaj naknadne obrade
 - Trajna dinamička izdržljivost σ_D



- „as-built“ $\sigma_D \approx 25\% \sigma_m$
- Naknadna obrada $\sigma_D \approx 35\% \sigma_m$

Ispitivanja zamora

- Alatni čelik EOS MS1 - uticaj naknadne obrade
 - Trajna dinamička izdržljivost - ANOVA

	p
Termička obrada	$3.0 \cdot 10^{-5}$
Površinska obrada	$1.0 \cdot 10^{-5}$
Interakcija	$1.0 \cdot 10^{-6}$

– Pravila dizajna

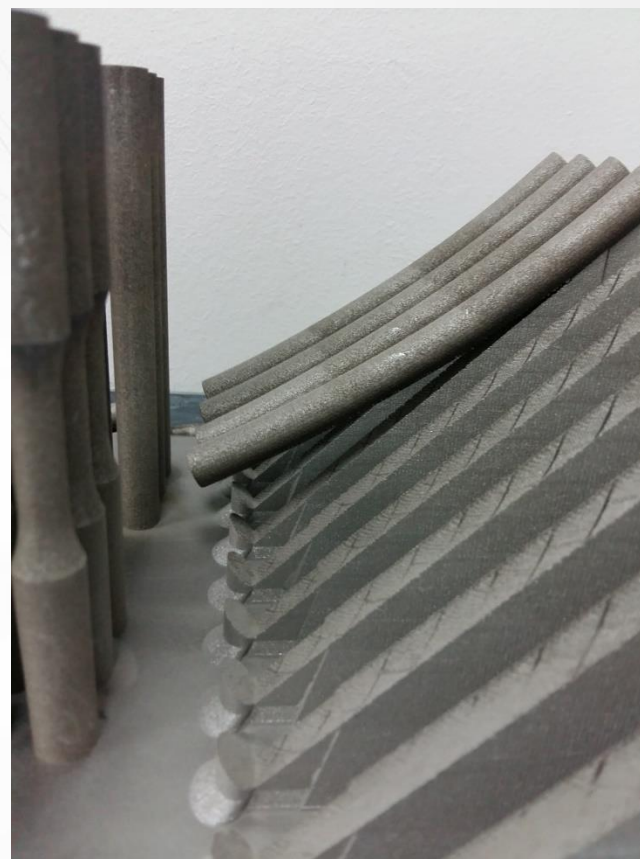
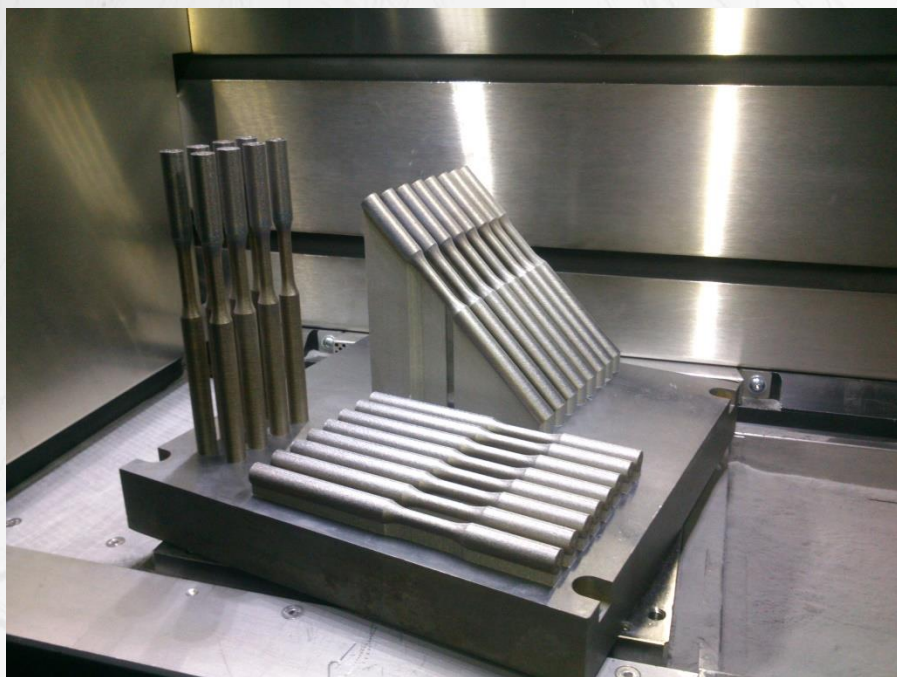
- Trajna dinamička izdržljivost proizvoda od alatnog čelika EOS MS1 napravljenih tehnologijom DMLS se povećava
 - termičkom obradom i/ili peskarenjem čeličnom sačmom,
 - kada mašinskoj obradi prethodi termička obrada,
 - kada se nakon mašinske obrade deo ispeskari čeličnom sačmom

Gde nam treba pomoć?

PROBLEMI ISTRAŽIVANJA

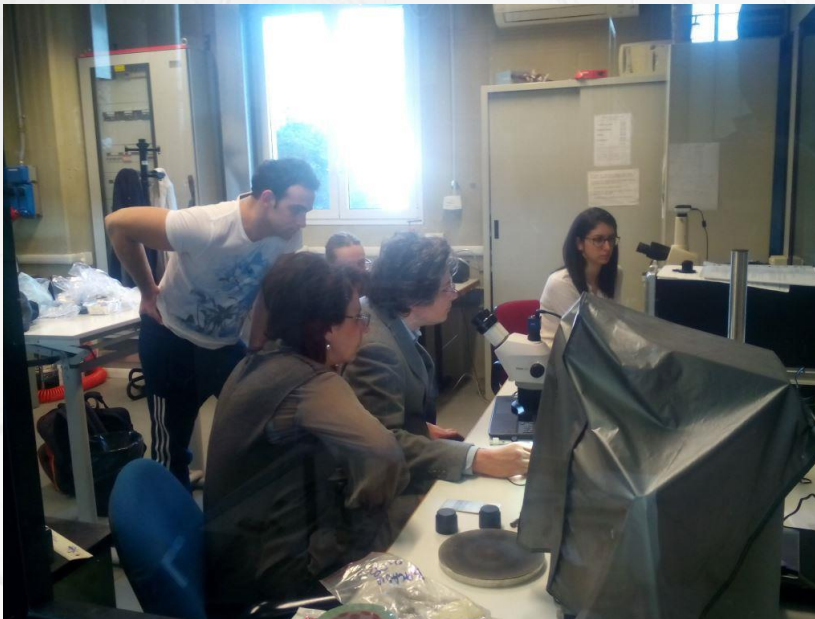
Problemi istraživanja

- Pojava zaostalih napona u proizvodnji



Problemi istraživanja

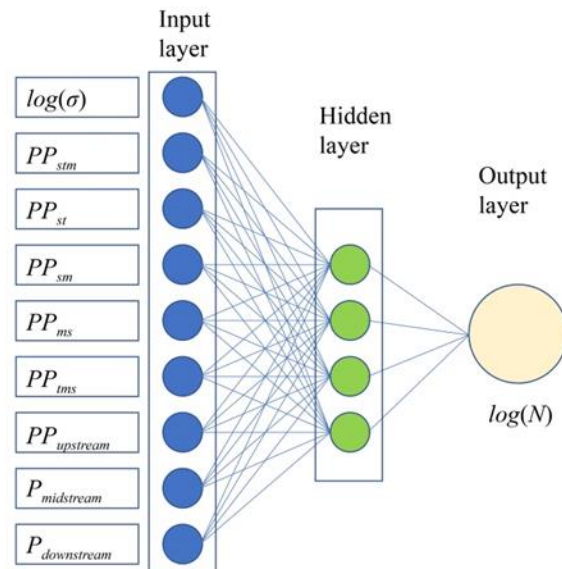
- Nedostatak kadra i opreme za metalografska ispitivanja
- Zamor proizvoda aditivnih tehnologija je „vruća“ tema
- Mehanika loma ?!



„Aditivne tehnologije su carstvo defekata“

Problemi istraživanja

- Tumačenje trendova otkrivenih ANOVA metodologijom
 - Primena mašinskog učenja u tumačenju rezultata?



Tumačenja opaženih trendova

- Poznato da je da na dinamičku izdržljivost utiču
 - Defekti materijala
 - Zaostali naponi
- Uzroci
 - Osobenost proizvodnog procesa
 - Osobenost materijala

Tumačenja opaženih trendova

- Aditivne proizvodne tehnologije
 - DMLS
 1. Nehomogeno formiranje sloja
 2. Slojevitost struktura uzorka
 3. Visoki temperaturni gradijenti tokom proizvodnje

Tumačenja opaženih trendova

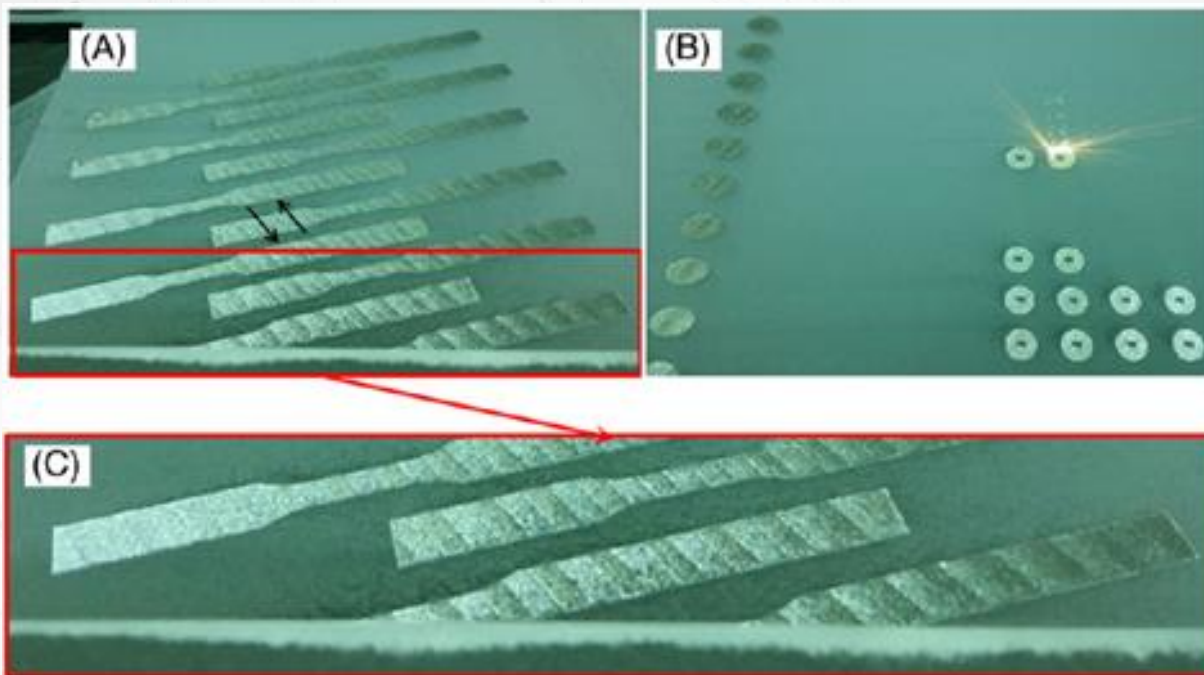
1. Nehomogeno formiranje sloja

- Putanja laserskog snopa koji topi materijal
- Poroznost materijala usled zahvatanja mehurova gasa tokom brzog hlađenja
- Ponovno korišteni prah
 - Prisustvo uključaka oksida koji nastaju tokom laserskog sinterovanja i ostaju nakon prosejavanja praha
 - Parcijalno sinterovanje menja oblik i dimenzije čestica praha, što kasnije uzrokuje poroznost

Tumačenja opaženih trendova

1. Nehomogeno formiranje sloja

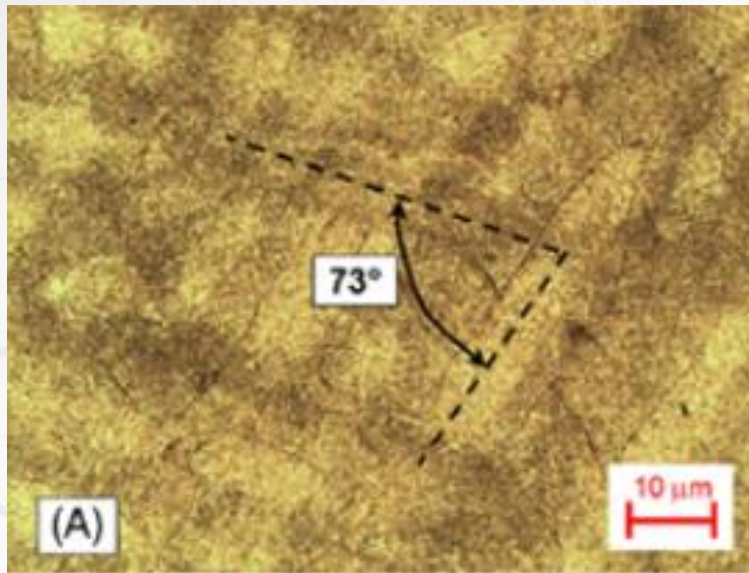
– Putanja laserskog snopa



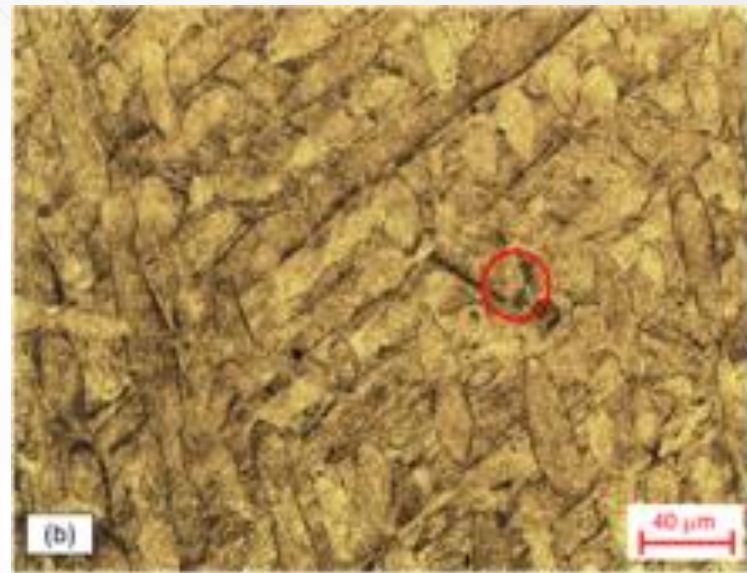
Tumačenja opaženih trendova

1. Nehomogeno formiranje sloja

– Putanja laserskog snopa



PH1

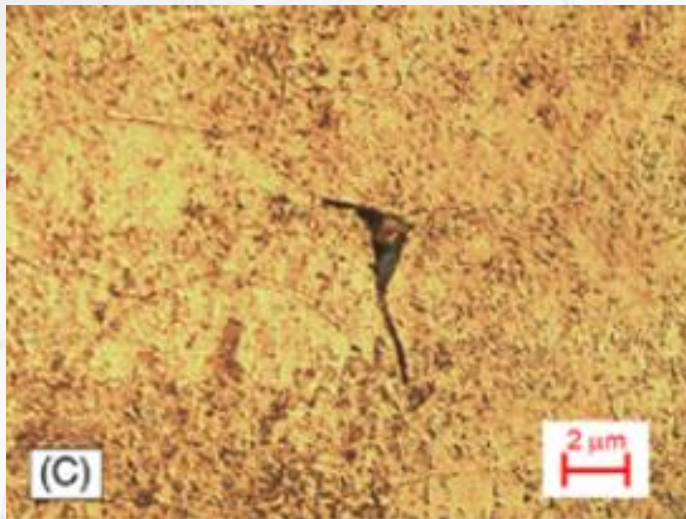


MS1

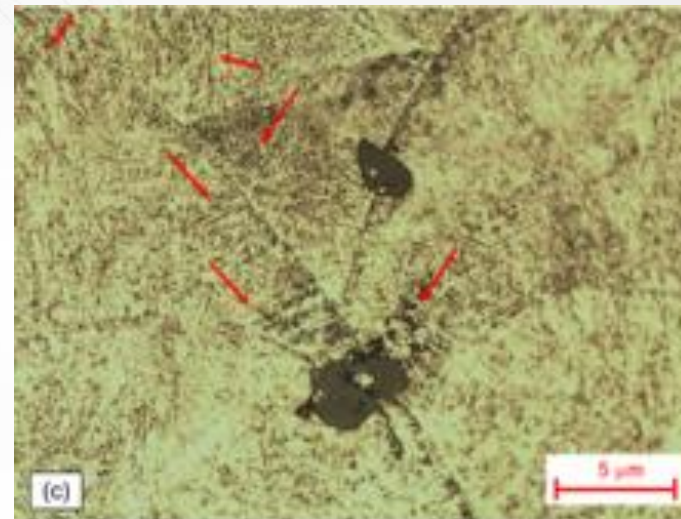
Tumačenja opaženih trendova

1. Nehomogeno formiranje sloja

- Defekti materijala po celoj površini sloja



PH1

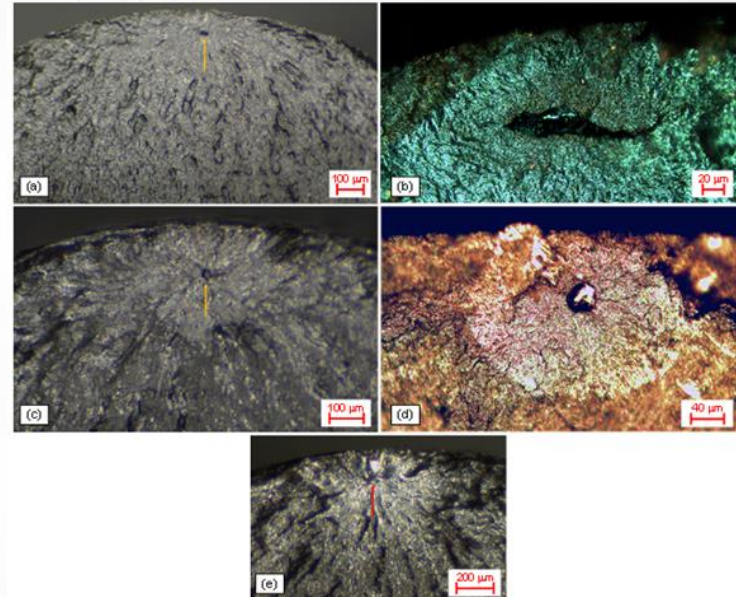
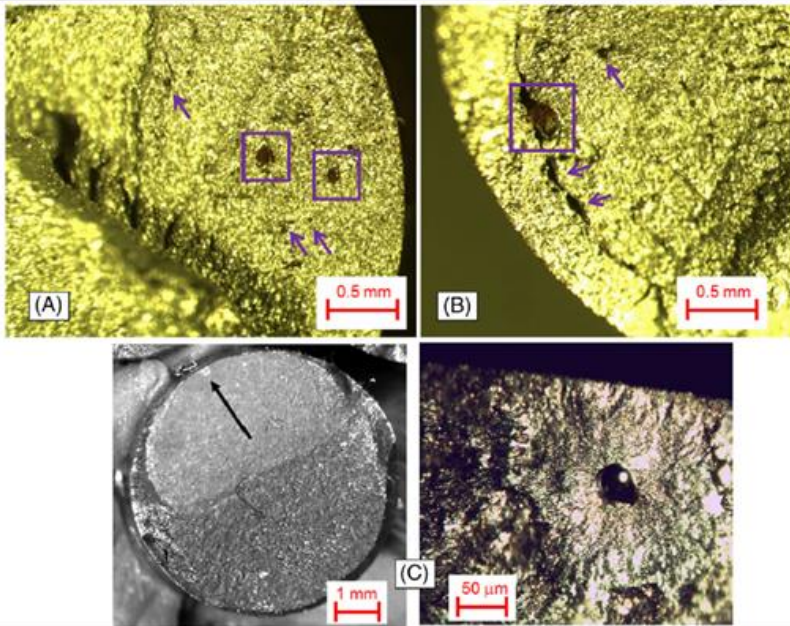


MS1

Tumačenja opaženih trendova

1. Nehomogeno formiranje sloja

- Prsline nastaju na defektima tipičnog prečnika $50\mu\text{m}$ na rastojanju oko $80\mu\text{m}$ ispod površine



Tumačenja opaženih trendova

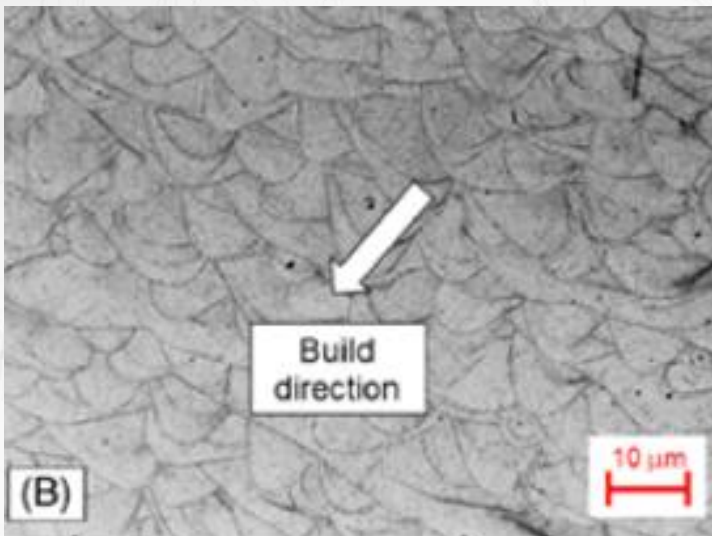
1. Nehomogeno formiranje sloja

- Prsline nastaju na defektima tipičnog prečnika $50\mu\text{m}$ na rastojanju oko $80\mu\text{m}$ ispod površine
- Peskarenje metalnom sačmom povećava σ_D
- Ako se mašinska obrada vrši nakon peskarenja metalnom sačmom σ_D se smanjuje
 - Usled tehnologije, defekti su prisutni po celom poprečnom preseku

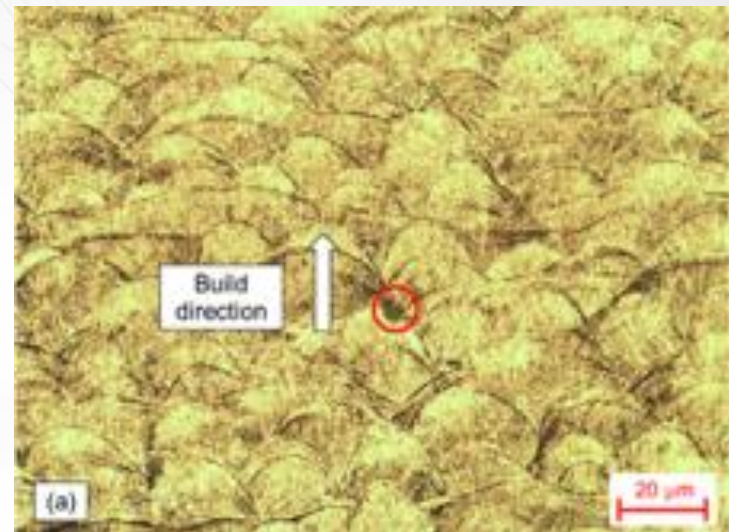
Tumačenja opaženih trendova

2. Slojevita struktura uzorka (anizotropija)

– Umanjuje se termičkom obradom



PH1



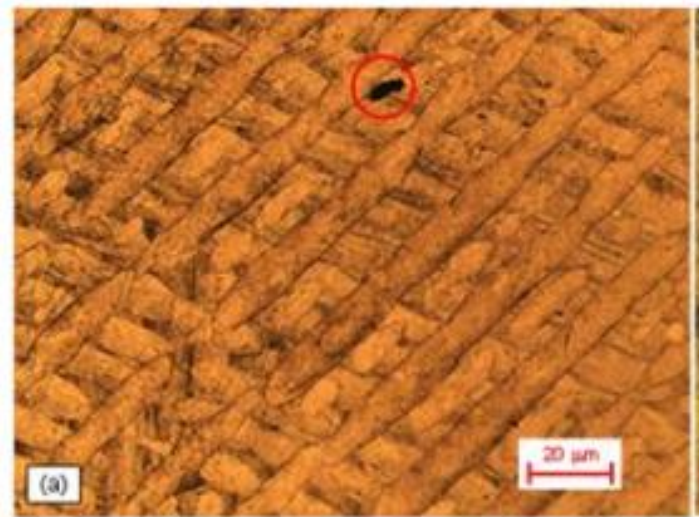
MS1

Tumačenja opaženih trendova

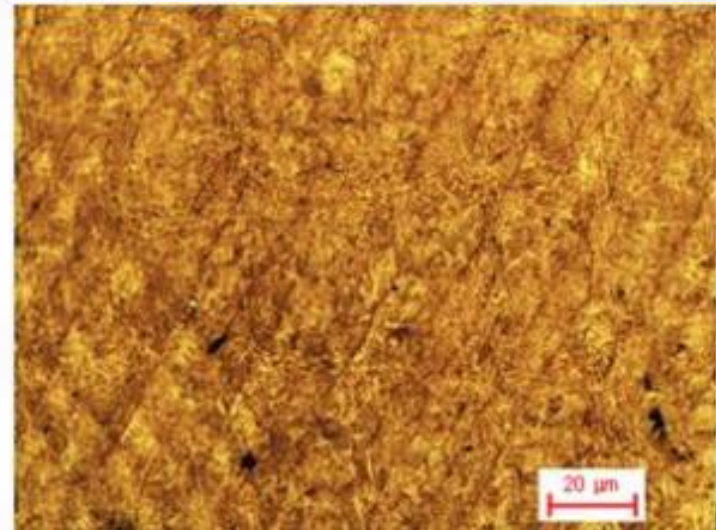
2. Slojevita struktura uzorka (anizotropija)

– Umanjuje se termičkom obradom

u ravni sloja



MS1 – Set 10 – as built



MS1- set 18 – termička obrada

Tumačenja opaženih trendova

2. Slojevitost struktura uzorka (anizotropija)

– Granice među slojevima predstavljaju barijeru prostiranju prslina?! (ranija hipoteza za legure aluminijuma proizvedene AM tehnologijama)

- Nakon zagrevanja, anizotropija uzoraka MS1 je manja nego anizotropija PH1 (zadržava slojevitost strukturu)
- Uticaj orijentacije uzorka na σ_D PH1
 - Kod horizontalno građenih uzoraka površine slojeva (i broj defekata) su veći nego kod koso građenih uzoraka
 - Kod vertikalno građenih uzoraka pravac širenja prsline leži u ravni sloja, ne nailazeći na granicu među slojevima

Tumačenja opaženih trendova

3. Visoki temperaturski gradijenti tokom proizvodnje

- Uzrokuju zatezne zaostale napone (70-100 MPa)
 - Smanjuju se termičkom obradom
 - Smanjuju se mašinskom obradom
 - U površinskom sloju se smanjuju peskarenjem sačmom
- Veći koeficijent termičke ekspanzije PH1 dovodi do većih zaostalih napona, i veće osetljivosti σ_D na procedure naknadne obrade

A_MADAM tim





Coordinator
FAKULTET ZA MASINSTVO I GRADJEVINARSTVO
U KRALJEVO UNIVERZITETA U KRAGUJEVCU
www.mfkv.rs

Partners
ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA DI BOLOGNA
www.unibo.it DIN department

STUDIO PEDRINI SRL
www.studiopedrini.it

TOPOMATIKA DOO
www.topomatika.hr

PLAMINGO DOO
www.plamingo.net

HORIZON 2020
The framework programme
for research and innovation

734455 (A_MADAM) - MSCA-RISE
Call: H2020 MSCA RISE 2016
Topic: MSCA-RISE-2016
Unit: REA/A/03



Thank you!

PROJECT SUPPORTED BY

