



آزمایشگاه تحقیقاتی
ساخت افزایشی
دانشگاه سمنان

مباحث منتخب (ساخت افزایشی)

مشخصه‌یابی محصولات

(Characterization)

استاد درس:

دکتر عبدالواحد کمی

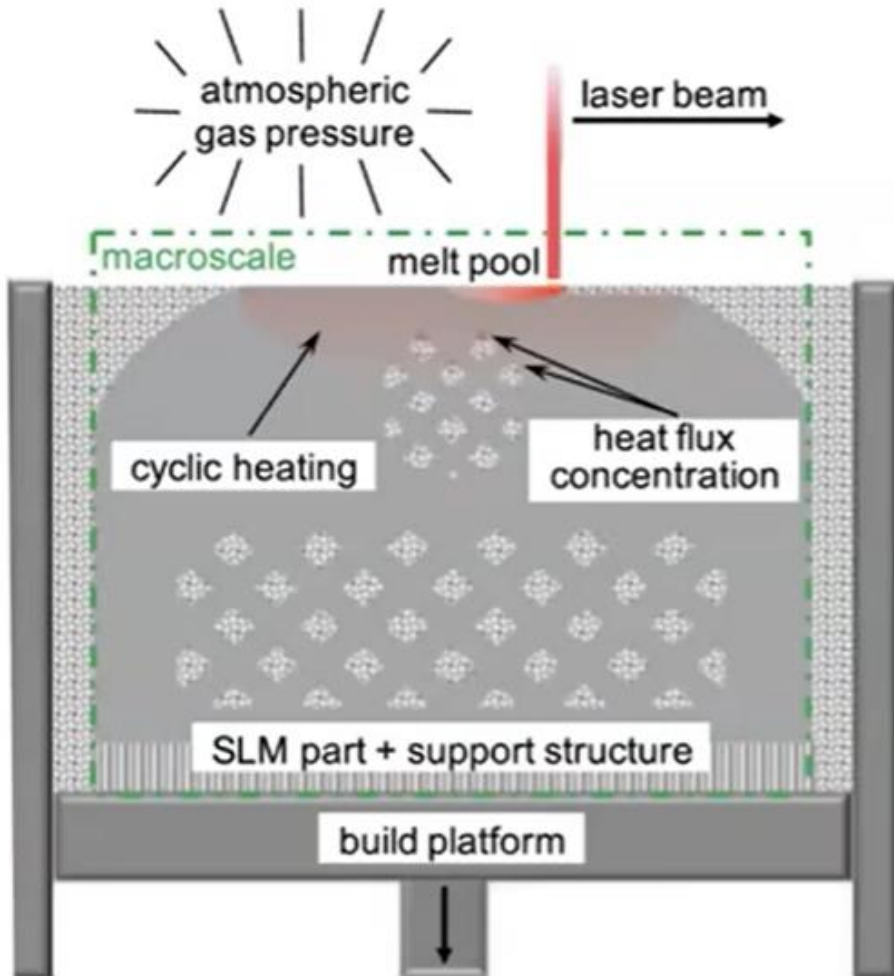
لیست مطالب:

- خواص متالورژیکی
- خواص مکانیکی
- عیوب قطعات فلزی و پلیمری
- خواص کامپوزیت های الیاف پیوسته

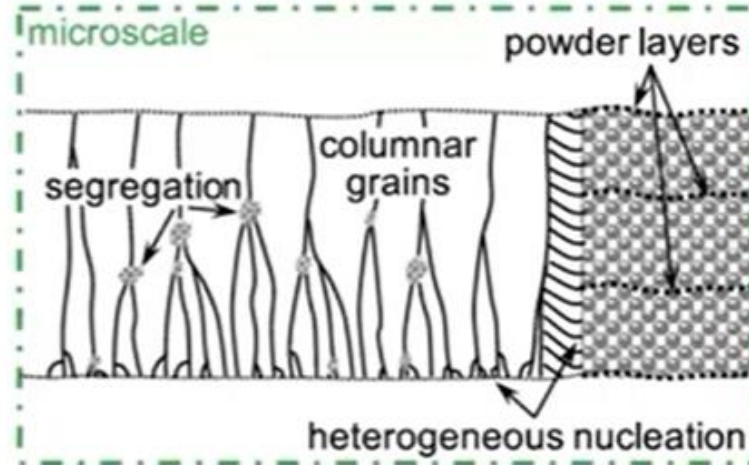
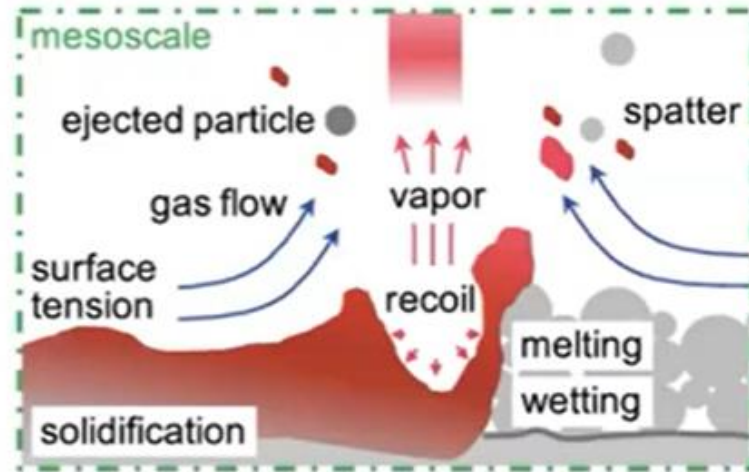
Complexity of the SLM process

فرایند SLM

پیچیدگی فرایند SLM



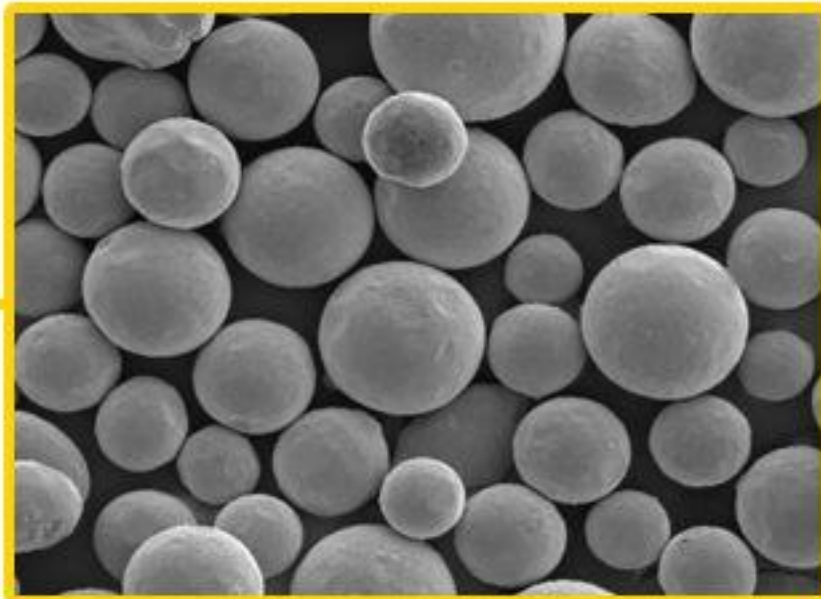
Suboptimal parameter choice:
Poor material quality, defects, failure



Opportunity for physics-based, predictive simulation models on different length scales

پودر فلزی

شکل، اندازه و توزیع ذرات پودر
روی خواص مکانیکی و متالورژیکی اثر
قابل توجه دارد.



پودر فلزی

• چگالی ظاهری تابعی است از توزیع ذرات با اندازه‌های مختلف و شکل پودر

• پودر کروی با اندازه ذرات یکنواخت:

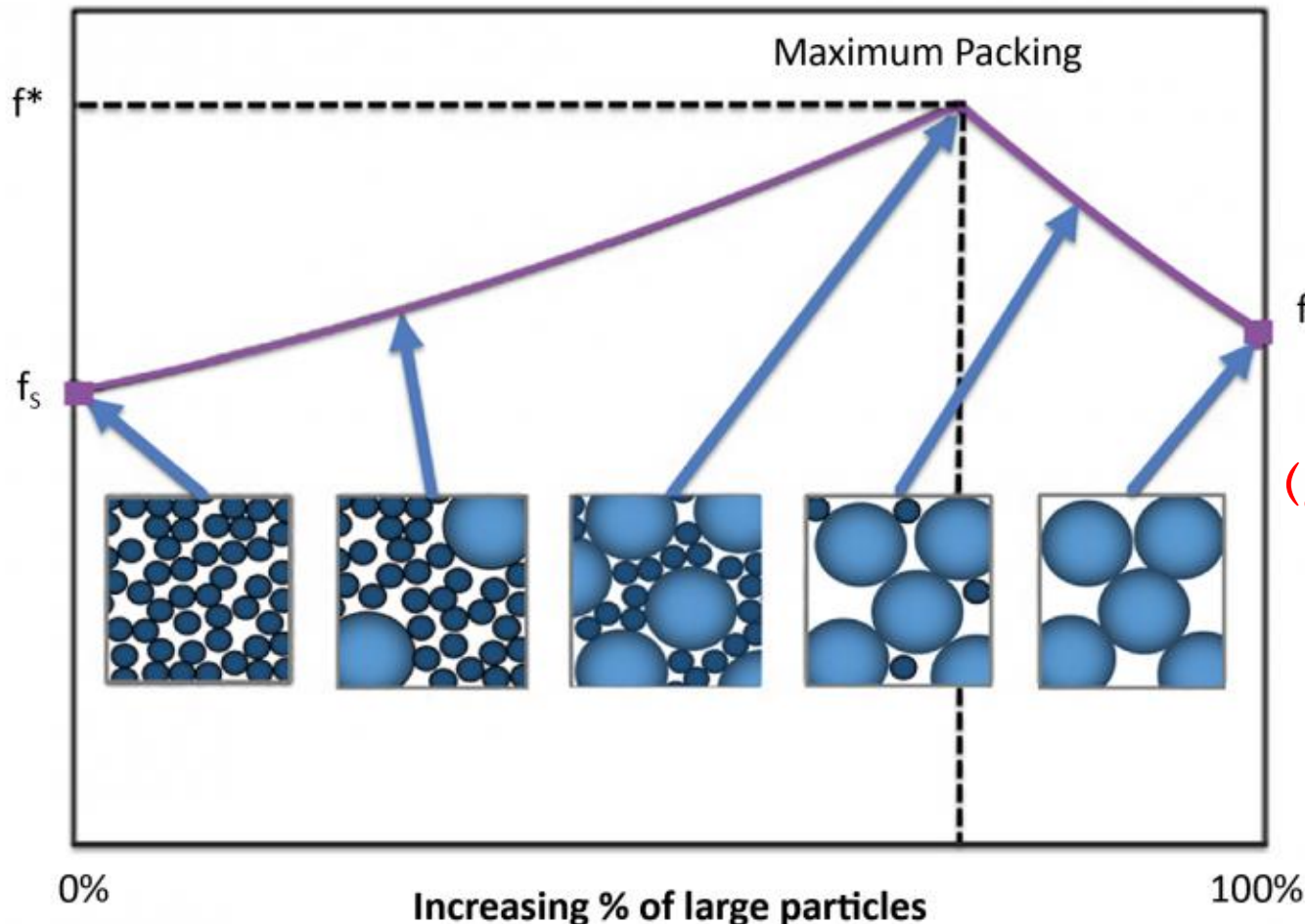
• چگالی ظاهری تئوری ۷۴٪

• اثرات افزایش چگالی ظاهری:

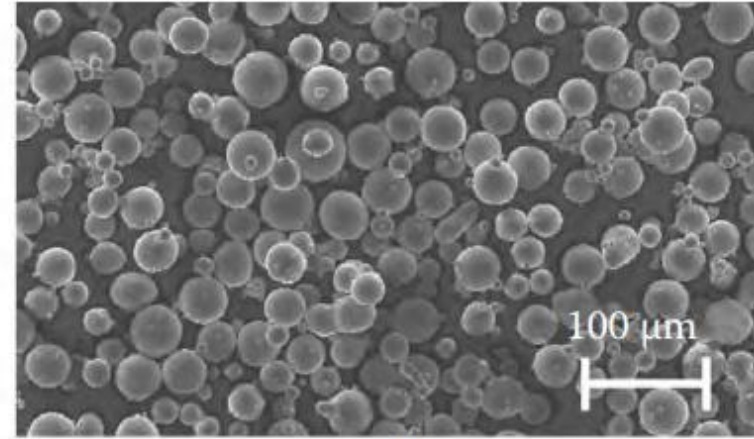
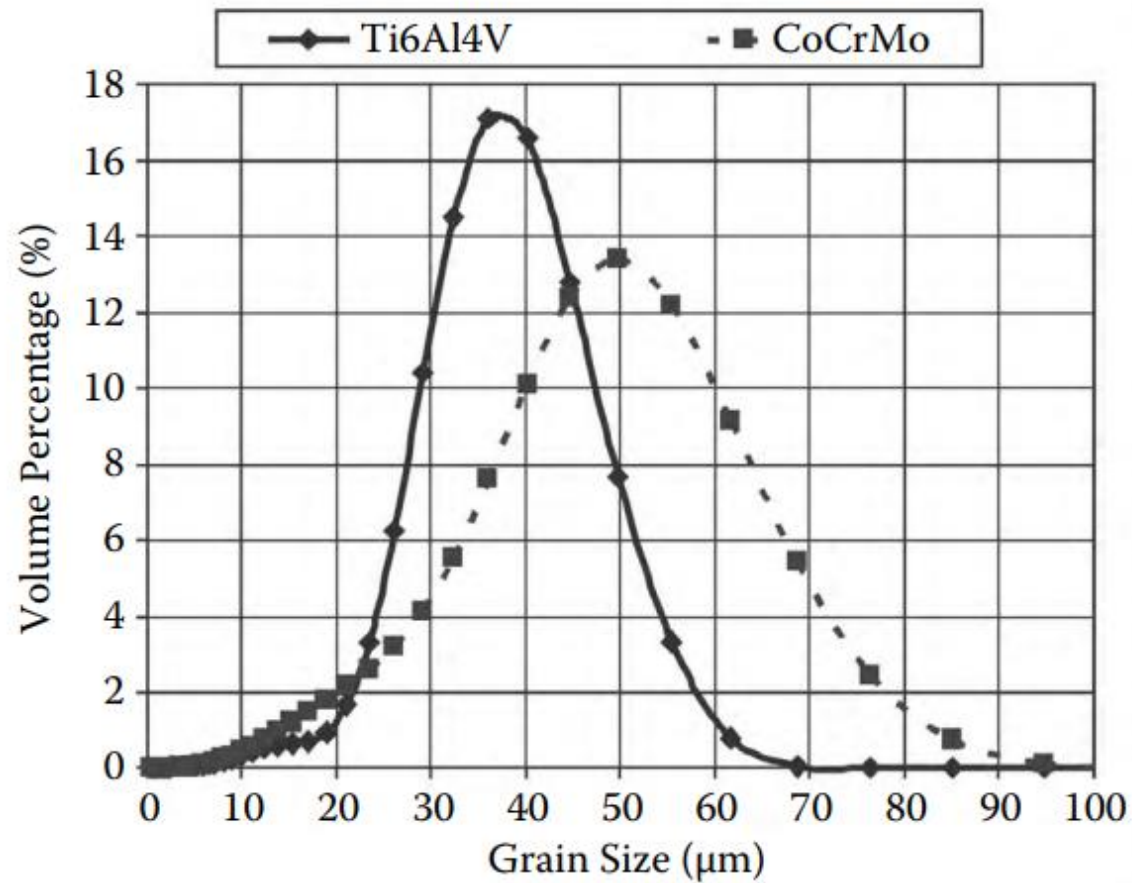
▪ افزایش هدایت حرارتی (نرخ گرم و سرد شدن)

▪ ریز دانه‌تر شدن ساختار

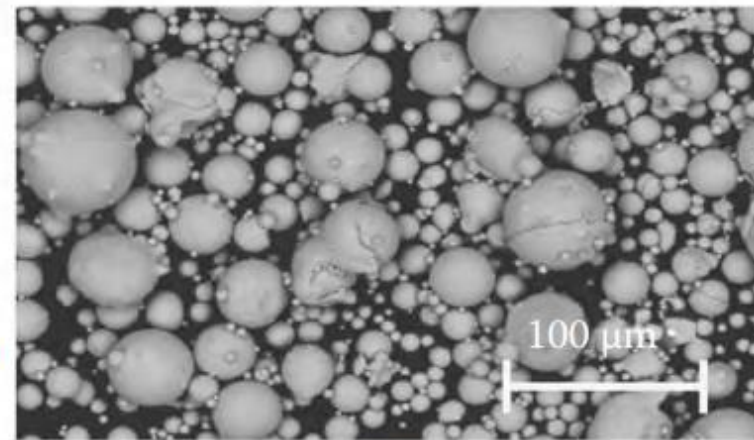
▪ بهبود خواص مکانیکی



توزیع ذرات در پودرهای تیتانیومی و کبالت - کروم



(A)



(B)

FIGURE 3.10 Powder size distribution and micrographs of (A) titanium and (B) cobalt-chromium powder.⁸

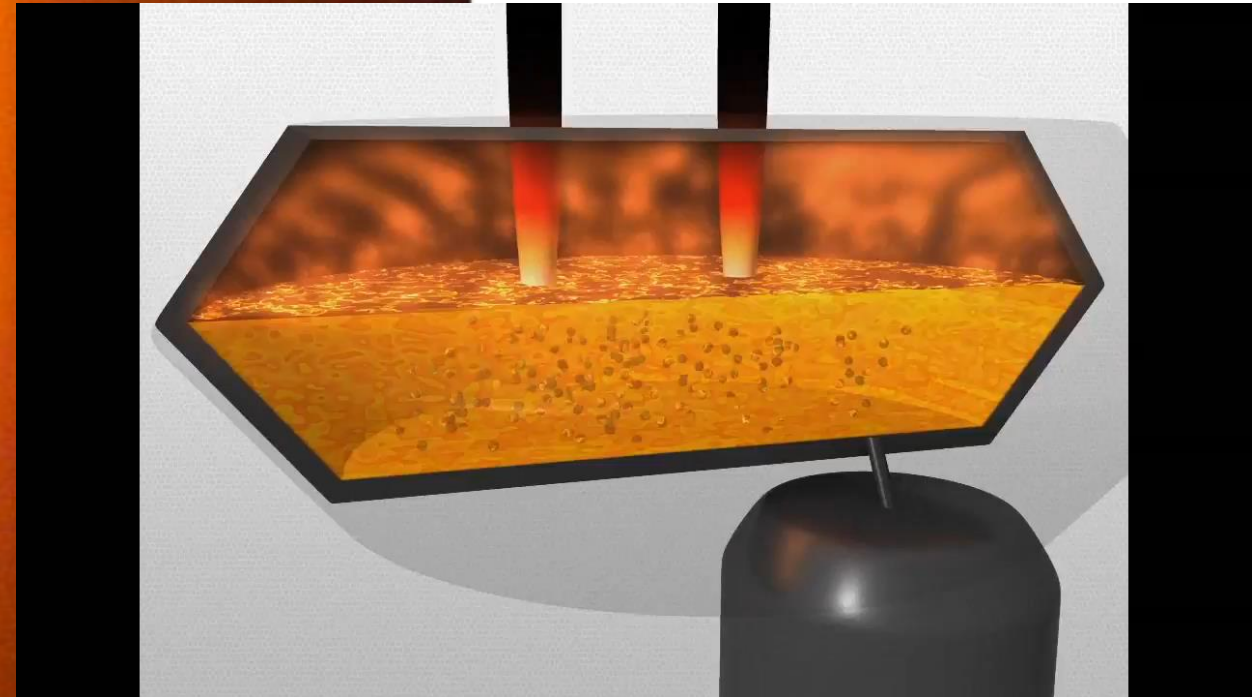
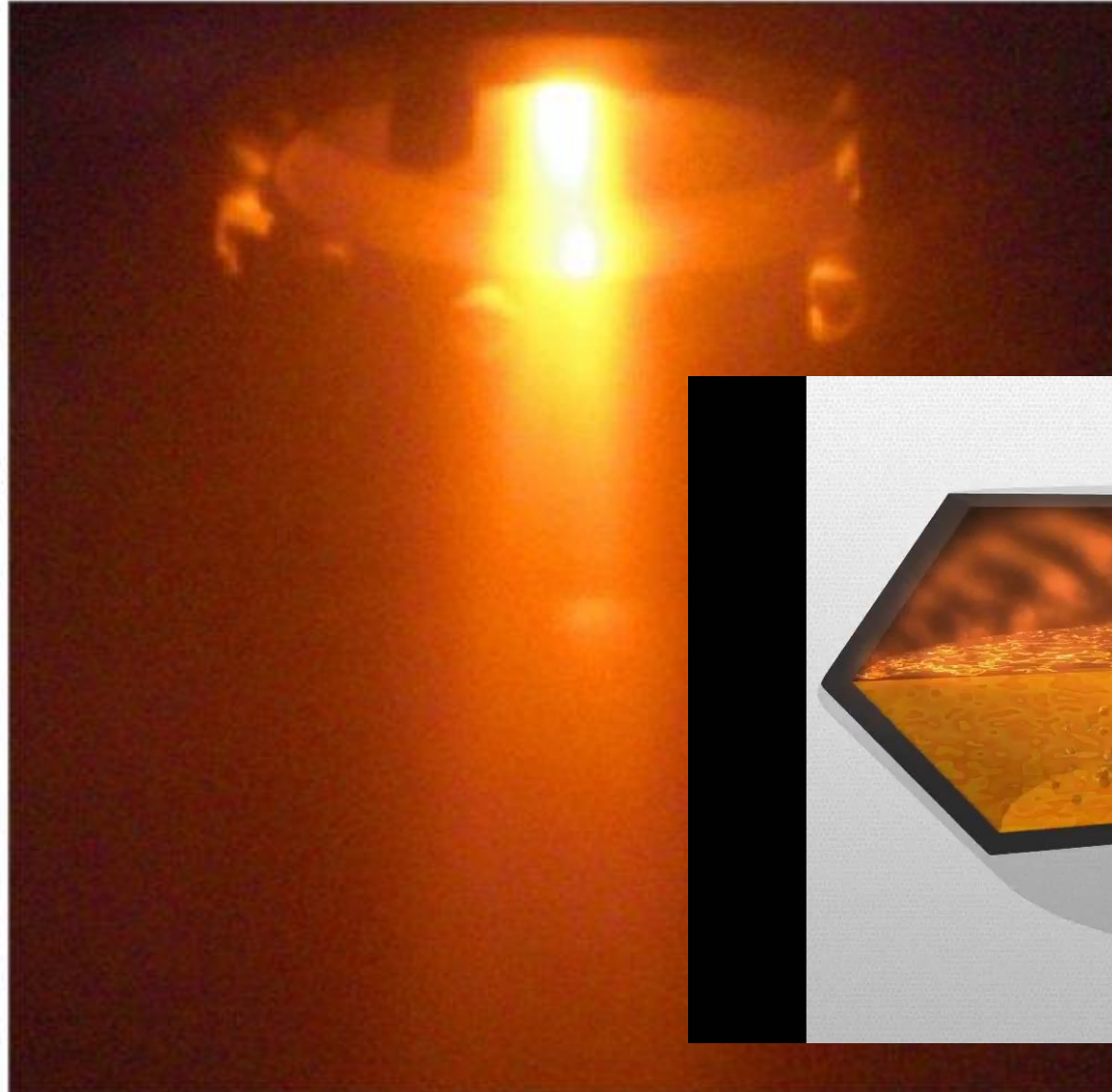
پودر فلزی

روش های تولید پودر فلزی

Process	Advantages	Disadvantages
Gas Atomisation (GA)	<ul style="list-style-type: none">• Excellent metallurgical quality• High powder flow rates• Wide selection of alloys• New and modified alloys can easily be made• Scalable technology: very high volumes available and can easily support AM growth• Large supply base• Relatively low cost, especially when AM increases quantities	<ul style="list-style-type: none">• Variability in powder properties between suppliers• Large number of suppliers and atomising technologies can be confusing• Reactive and high melting point alloys not available• Few companies currently atomising titanium
Induction Melted Bar Atomisation (EIGA)	<ul style="list-style-type: none">• Excellent metallurgical quality• High flow rates• Reactive and high melting point alloys can be made• Titanium alloys available• High production rates, but restricted by yield considerations	<ul style="list-style-type: none">• Limited supply base - but growing• Only alloys available as bar can be made• High cost
Plasma Atomised Wire Process (PAW)	<ul style="list-style-type: none">• Excellent metallurgical quality• Very high flow rates – near perfect spheres• Reactive and high melting point alloys can be made• Titanium alloys available	<ul style="list-style-type: none">• Limited supply base: only a few suppliers, and new patents may lock out additional suppliers• Only alloys available as wire can be made• High cost
Plasma Rotating Electrode Process (PREP)	<ul style="list-style-type: none">• Excellent metallurgical quality• Very high flow rates – perfect spheres• Reactive and high melting point alloys can be made• Titanium alloys available	<ul style="list-style-type: none">• Limited supply base but growing• High quality bar needed as starting material• High cost
Water Atomisation (WA)	<ul style="list-style-type: none">• Low cost• Scalable atomising technology	<ul style="list-style-type: none">• Metallurgical quality lower than gas atomisation• Powder not natively spherical• Not yet established for powder bed applications

پودر فلزی

روش اتمیزه گازی



تولیدکنندگان پودر تیتانیوم کروی شکل

Type	Producer
Gas atomized	ATI Powder (USA), formerly Crucible Research, division of Crucible Materials Corp
Gas atomized	Iowa Powder Atomization Technologies (USA) developmental process
Gas atomization/PREP	Affinity International (China)
Gas atomized (EIGA)	TLS Technik (Germany)
Gas atomized (EIGA)	Puris LLC (USA)
Gas atomized (TILOP, EIGA type)	Osaka Titanium Technologies (Japan)
PREP	Timet (USA), formerly Advanced Specialty Metals
PREP	Phelly Materials (China)
PREP	Baoji Orchid Ti (China)
Plasma atomized	ARCAM AB (Sweden), formerly Advanced Powders and Coatings, division of Raymor Industries
Induction plasma spheroidization	Tekna Plasma Systems (Canada)

پودر پلیمری

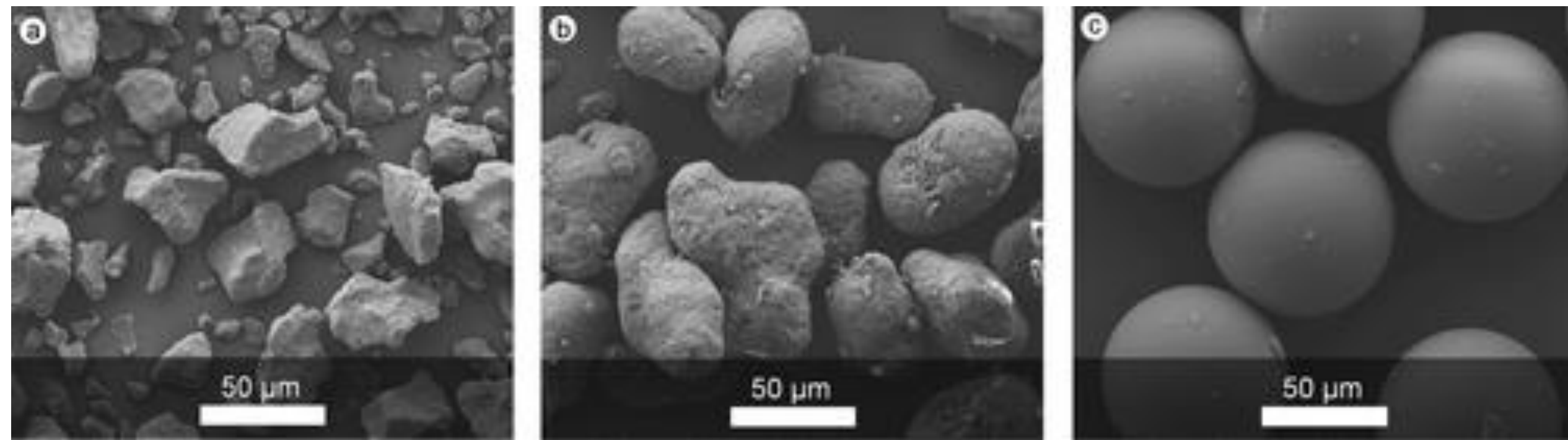
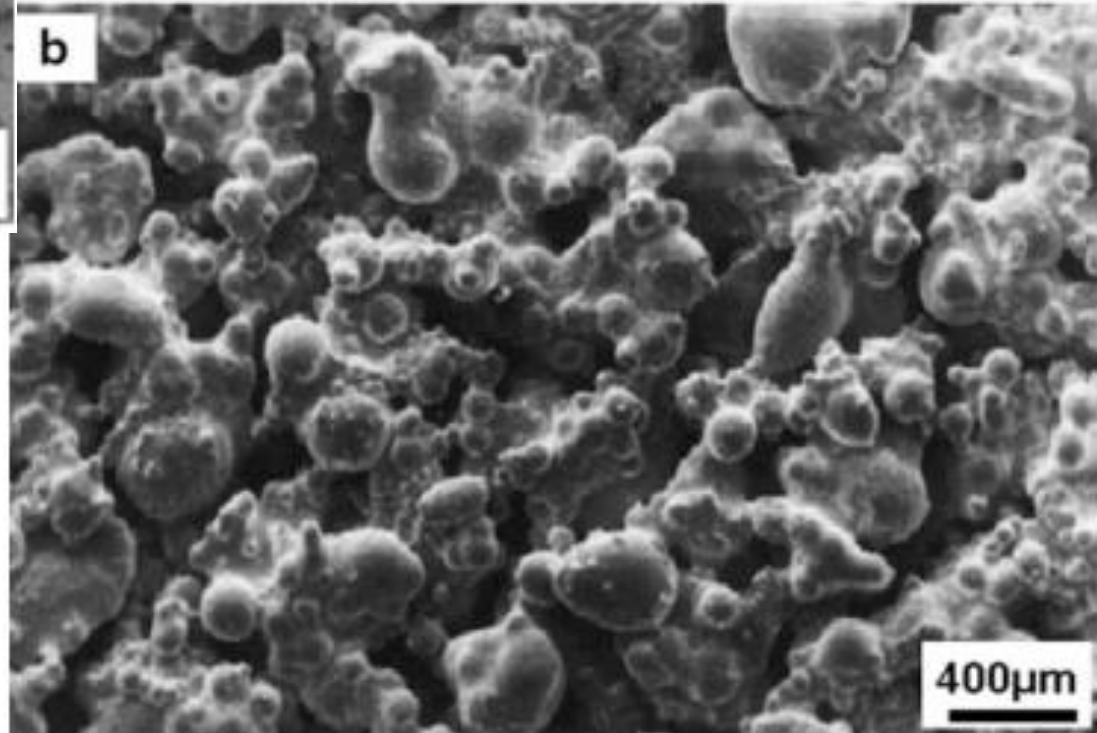
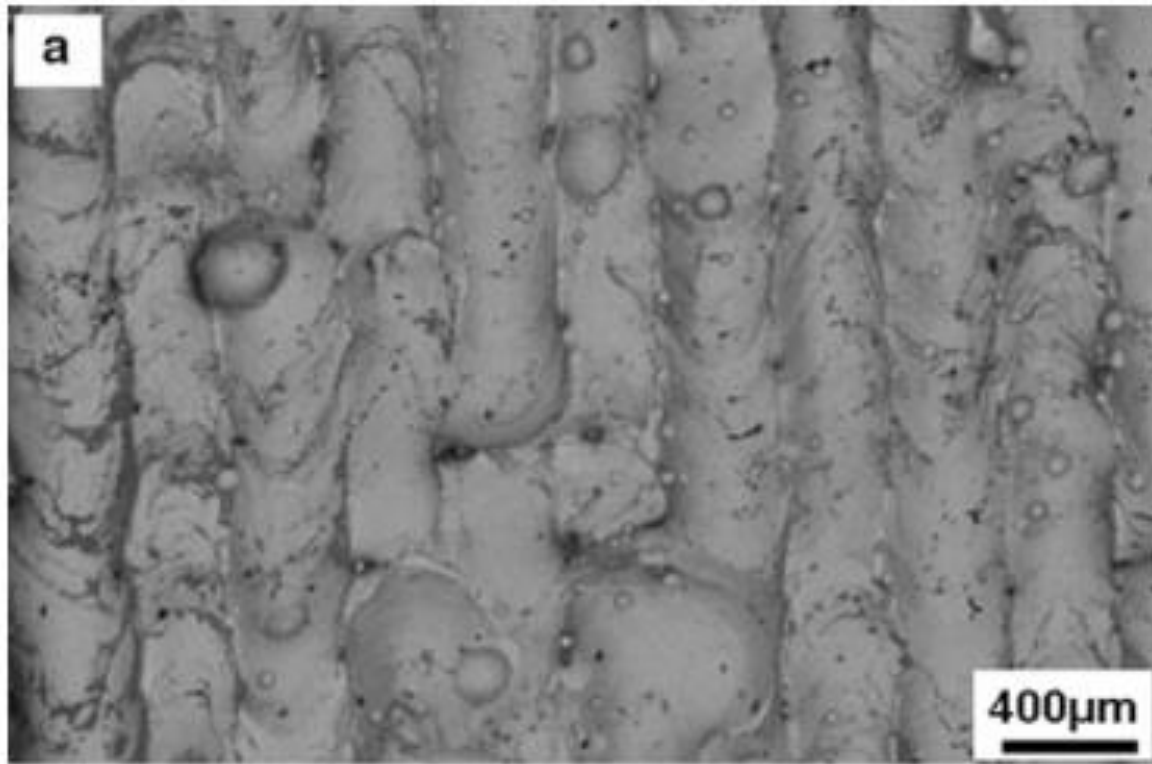


Figure 38. Morphology of commercial powders for polymer laser sintering. (a) **Cryogenically ground**, rough particles (PA-11 powder PA1101 from EOS GmbH); (b) potato-shaped particles precipitated from **ethanol solution** (PA-12 powder PA2200 from EOS GmbH); and (c) spherical particles produced by means of **emulsion polymerization** (PS powder PrimeCast 101 from EOS GmbH).

اثر فرایند ساخت بر خواص قطعه

• اثر فرایند ساخت بر خواص قطعه (شکل

مورفولوژی را نشان می دهد).



• ذوب کامل ذرات پودر در روش SLM بدلیل:

▪ توان لیزر بالاتر

▪ نقطه تمرکز کوچکتر

▪ ضخامت لایه کمتر

▪ عدم نیاز به عملیات ثانویه HIP، نفوذدهی یا تفجوشی

Fig. 2.5 Surface morphologies of M2 high speed steel components processed by a LM, see Ref. [22] and b LS, see Ref. [23]

اثر فرایند ساخت بر خواص قطعه

- از عیوب قابل توجه در قطعات ساخت افزایشی: تشکیل ترک و تنش پسماند است.

- تنش پسماند عامل اعوجاج و

- ترک قطعه است.

- تجمع مس در مرز دانه‌های آستنیت

- سبب تمایل به تشکیل ترک می‌شود.

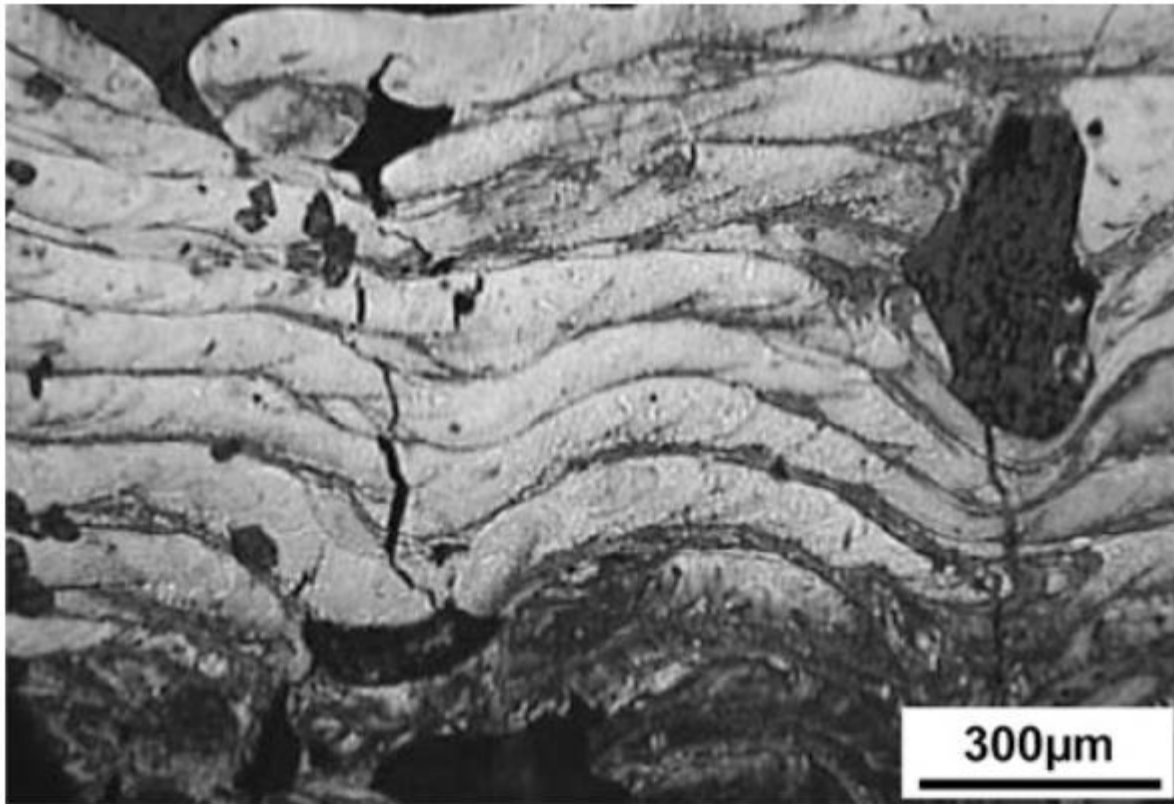


Fig. 2.6 Distortion and crack formation in LM-processed Cu-H13 powder, see Ref. [30]

تنش پسماند و تشکیل ترک

• افت خواص مکانیکی و کاهش عمر خستگی به دلیل تشکیل ترک در فولاد Hastelloy C276

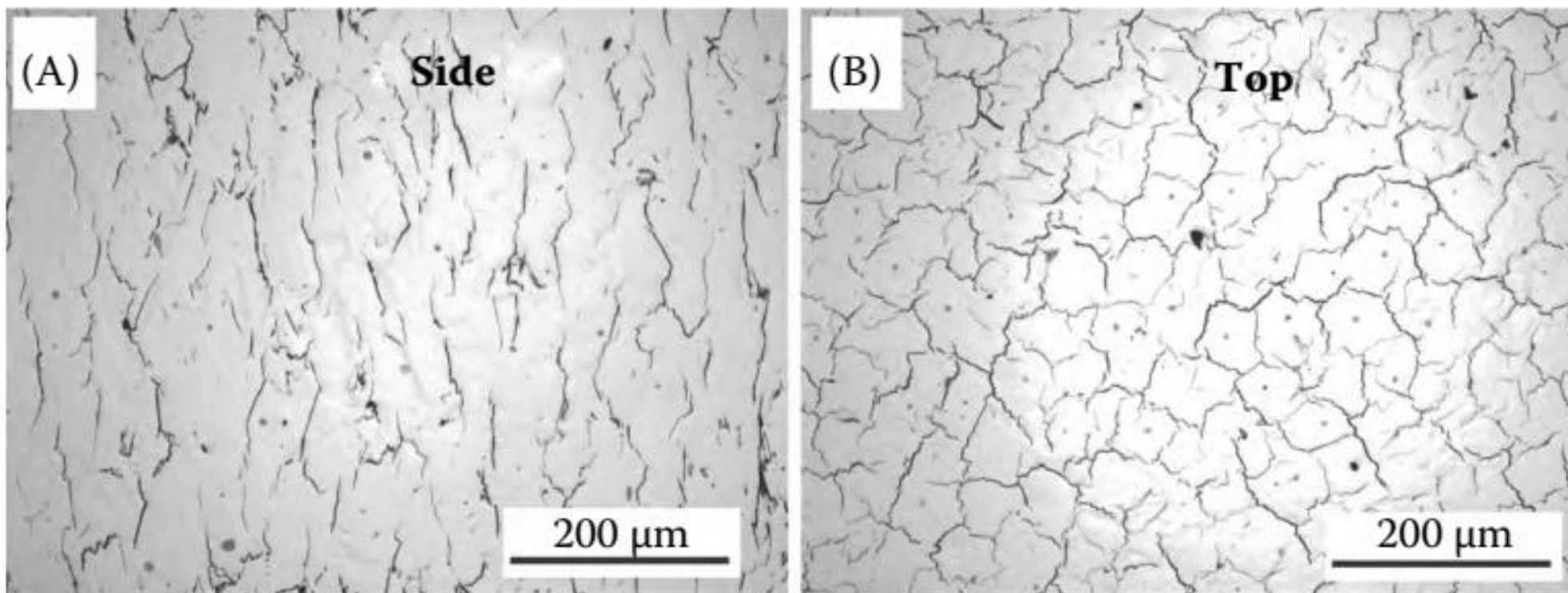


FIGURE 3.31 Cracks in SLM-produced Hastelloy C276.⁶⁵

تنش پسماند و تشکیل ترک

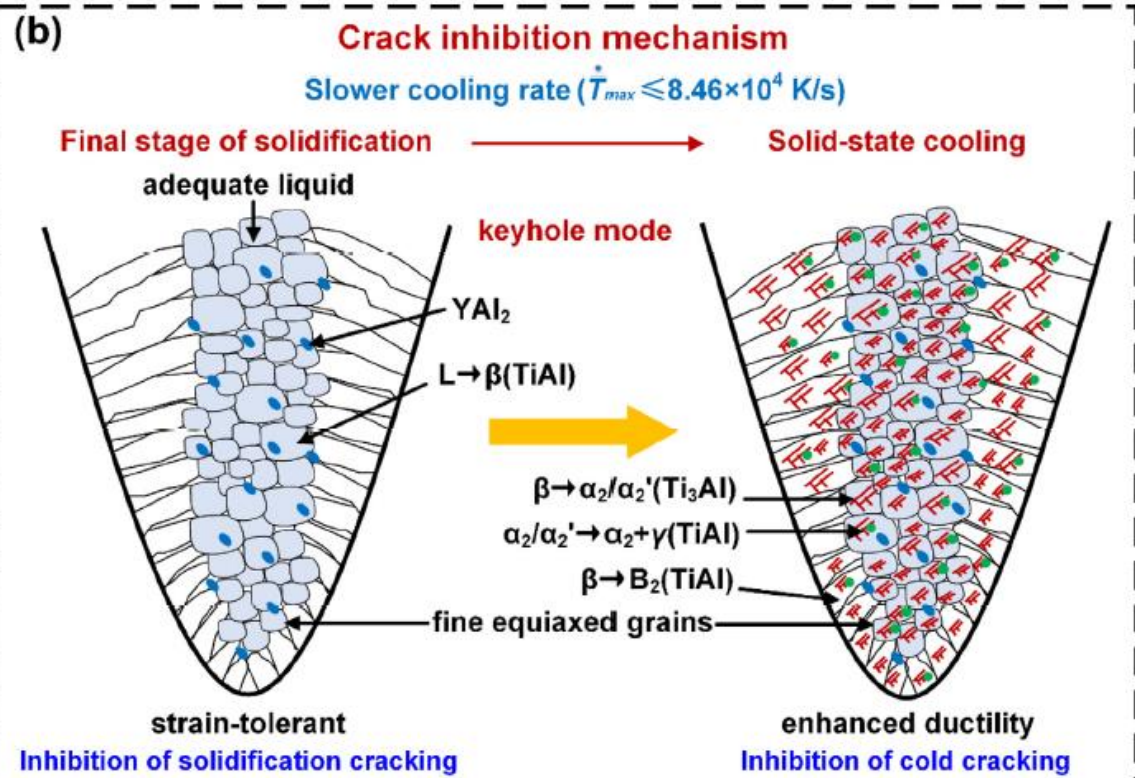
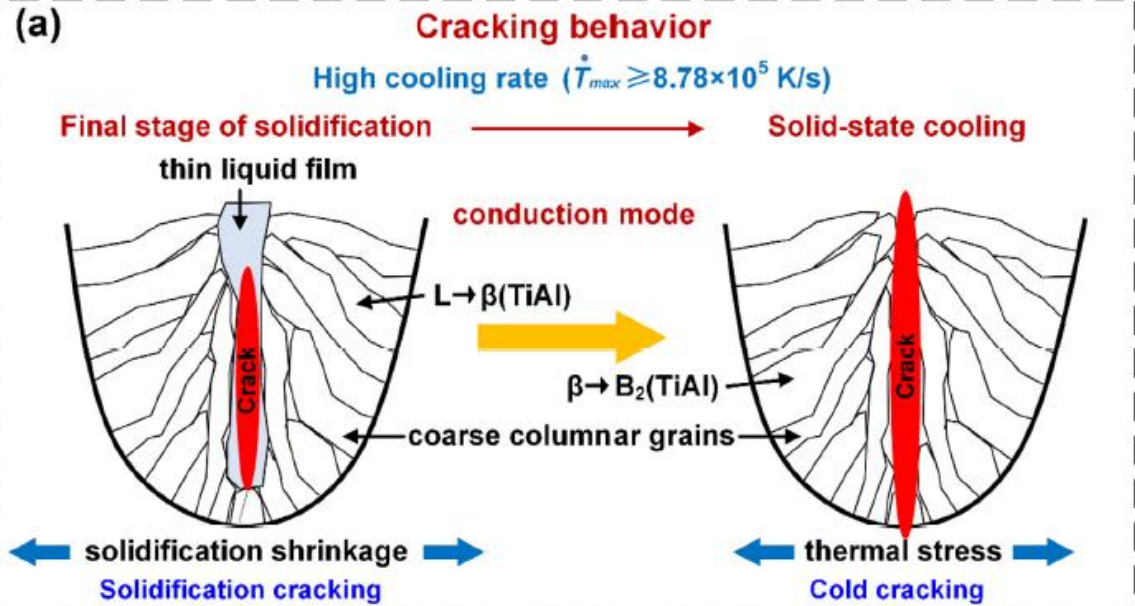
علت تشکیل ترک ناشی از تنش پسماند:

- ذوب زیر لایه و اعمال تنش فشاری بدون امکان انبساط ماده

- تغییر شکل پلاستیک به دلیل فراتر رفتن تنش ها از حد تسلیم ماده

- تمایل به انقباض زیر لایه در زمان انجماد و عمل کردن تنش های فشاری پیشین به صورت تنش های کششی و

ایجاد ترک



اثر پیش گرم بر کاهش تنش پسماند و عیوب قطعه

- رشد ترک‌های بین لایه‌ای به دلیل گرادیان حرارتی بالا و جدایش در قطعه
- **راهکارها:** کاهش طول بردار روبش، افزایش دمای فرایند یا کاهش گرادیان حرارتی (مثلاً با پیش گرم)
- دمای پیش گرم در SLM، ۲۰۰ و در EBM تا ۱۰۶۰ درجه سانتی‌گراد افزایش داده می‌شود.

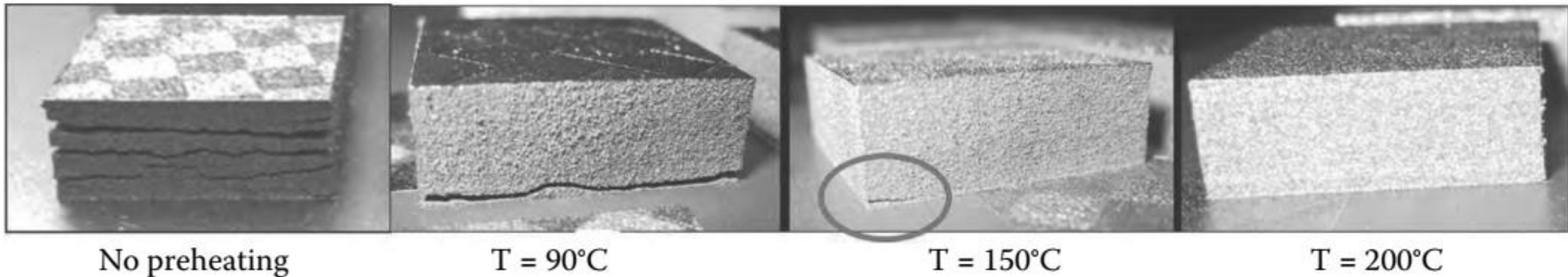


FIGURE 3.32 Cracks/delaminations formed in M2 high-speed steel parts without preheating during SLM; they are gradually reduced and eliminated by preheating the base plate during the process (preheating temperatures are shown below the parts).¹³

تنش پسماند

تنش ها در جهت عمود بر

مقطع شکست نمونه

• تنش ها در جهت ساخت ۲ تا

۳ برابر جهات دیگر است.

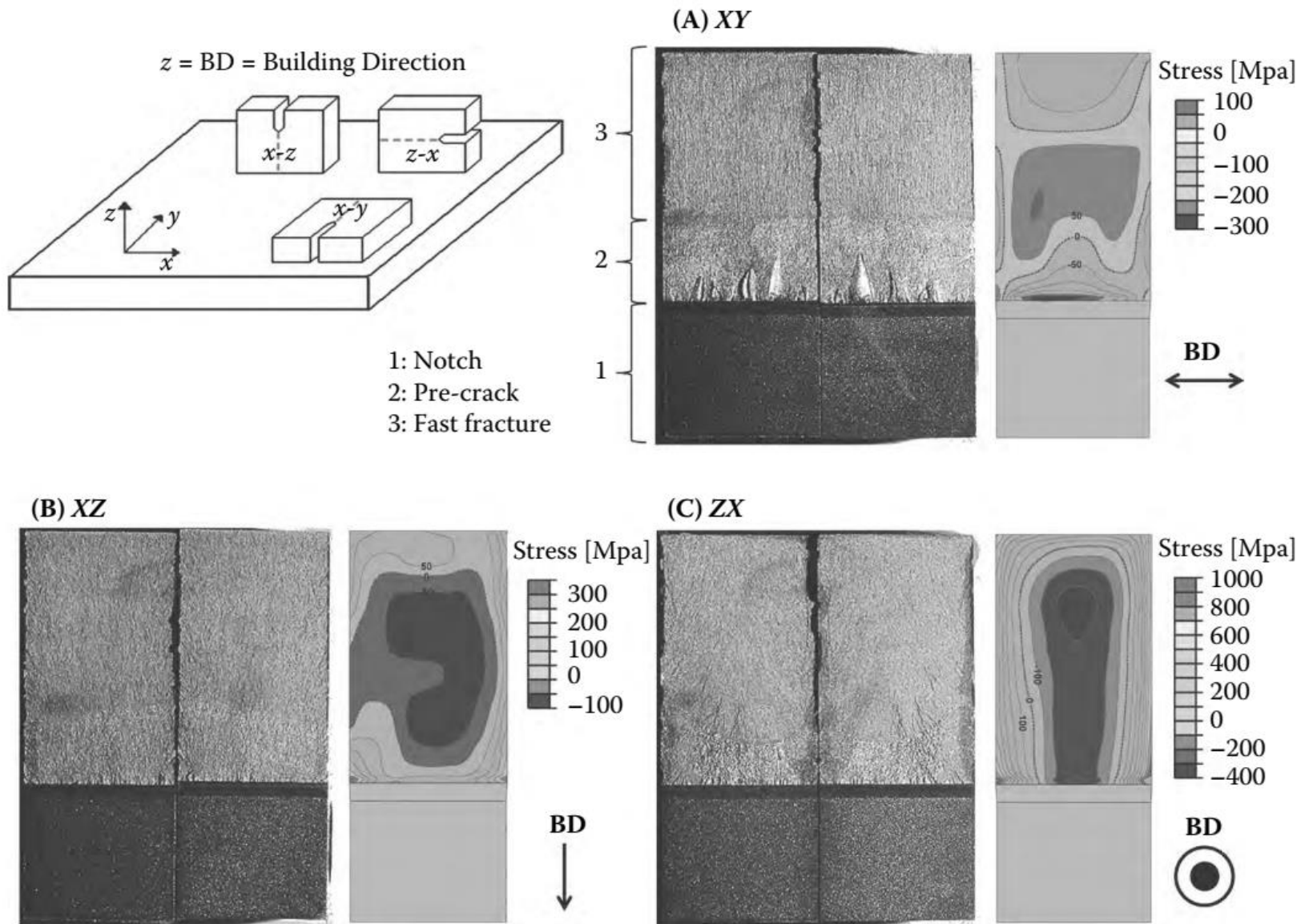


FIGURE 3.33 Residual stresses in compact tension specimens of SLM-produced Ti6Al4V. As indicated by the fracture surfaces, the residual stresses influence the crack propagation and therefore the behavior of the material under loading conditions. Notice the large stresses in the z,x specimen compared to the x,z and x,y specimens. The stresses in the z,x specimen are parallel to the building direction.⁷³



اثر فرایند بر ساختار قطعه

- عدم مشاهده لایه ها در EBM و یکپارچه بودن آن (مشابه ساختار ریخته گری شده) و تخلخل کمتر به دلیل دمای بالاتر بستر و پودر
- نرخ سرد شدن بالا در MLS و عدم رشد دانه ها
- ذوب موضعی لایه پیشین در MLS
- مشاهده ساختار لایه ای در مواد با دمای ذوب بالا:
 - سرعت اسکن زیاد
 - دمای بستر کم
 - توان اشعه کم
 - ضخامت لایه و فاصله اسکن زیاد

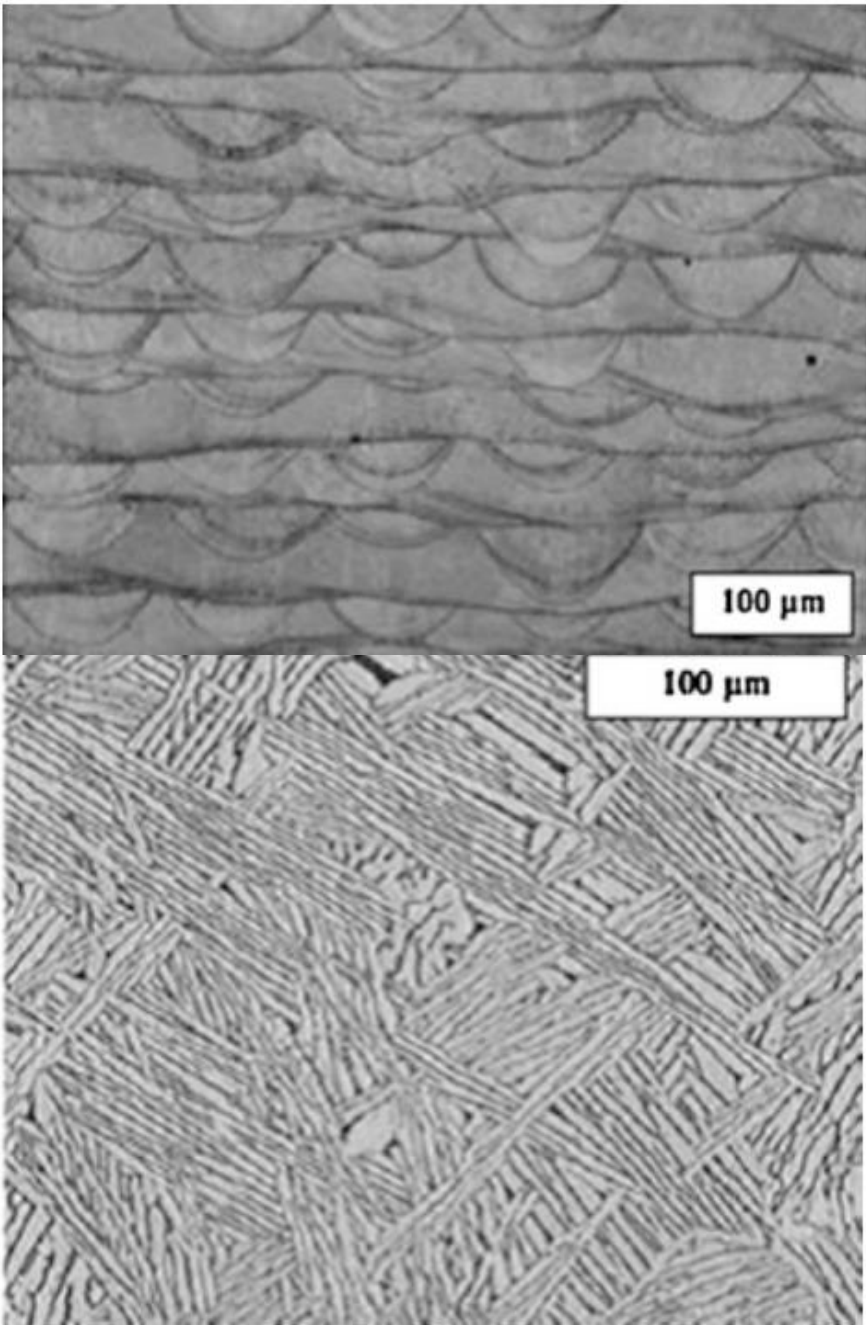


Fig. 5.17 Representative CoCrMo mLS microstructure (left, courtesy: EOS), and Ti6Al4V EBM microstructure (right, courtesy: Arcam)

ساختار قطعات SLM مواد مختلف

- دو نوع ساختار در قطعات SLM ایجاد می شود: ۱- ساختار ستونی و ۲- ساختار سلولی ریز

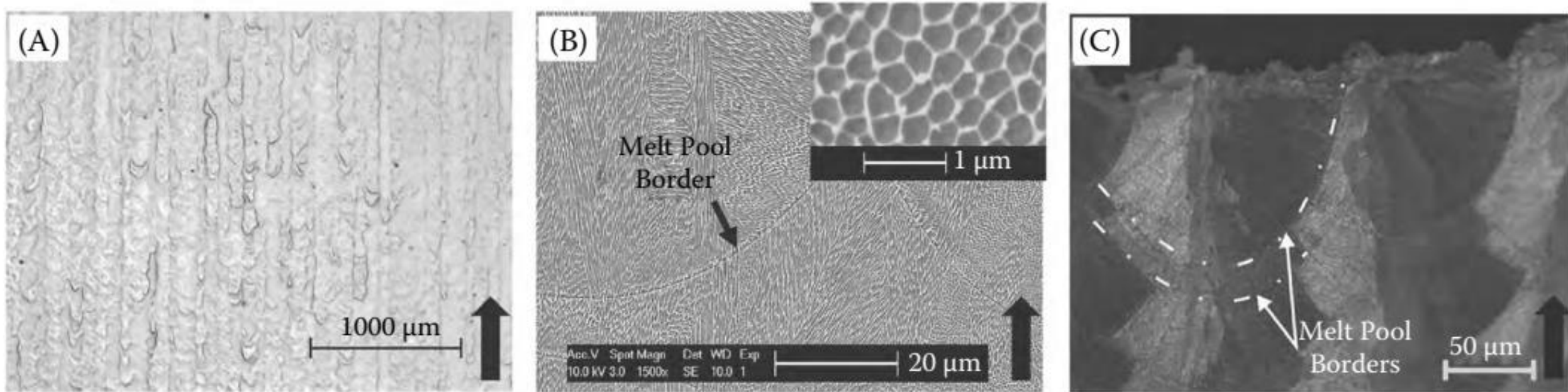


FIGURE 3.26 Side view (upward black arrows indicate the building direction) of the microstructure after SLM: (A) columnar Ta;⁶³ (B) cellular 18Ni300 maraging steel, where the insert shows the cellular structure;⁶⁵ and (C) AlSi10Mg grains oriented toward the center of each melt pool.⁶⁶ Notice the difference in scale.

ساختار قطعات SLM مواد مختلف

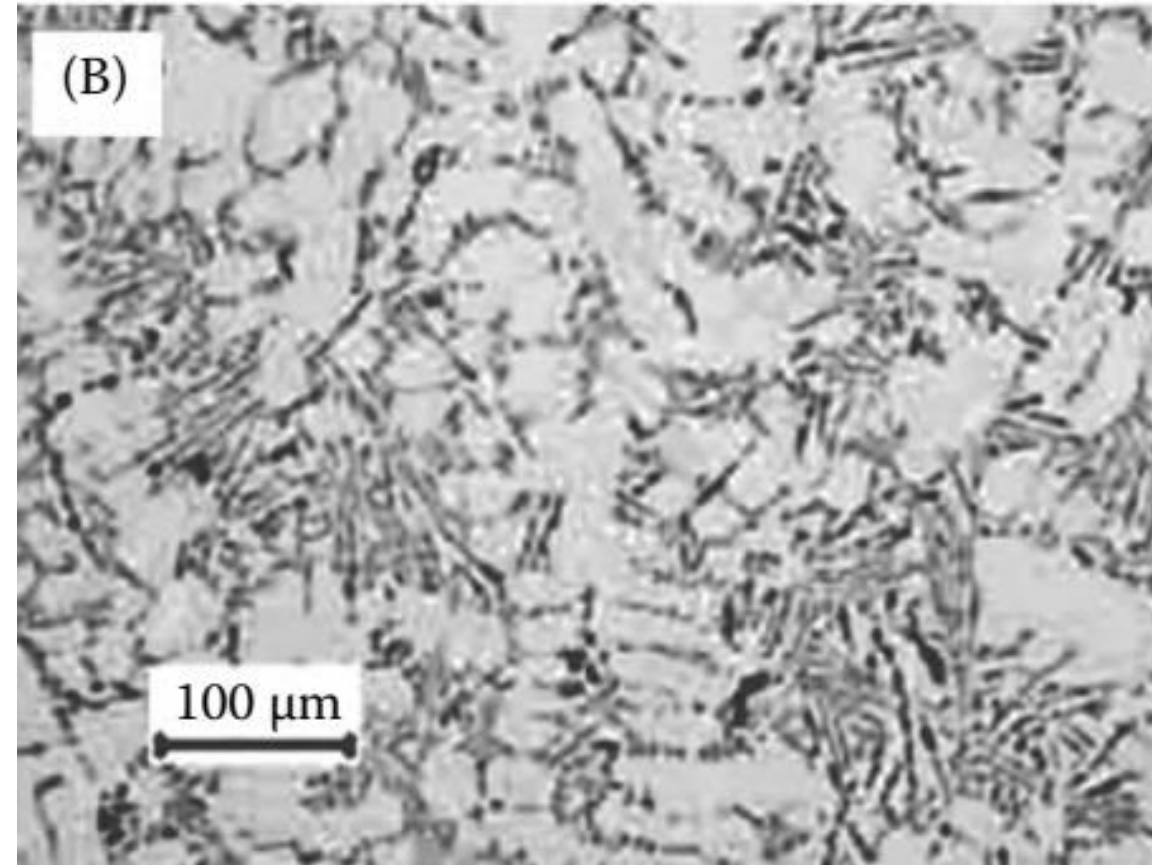
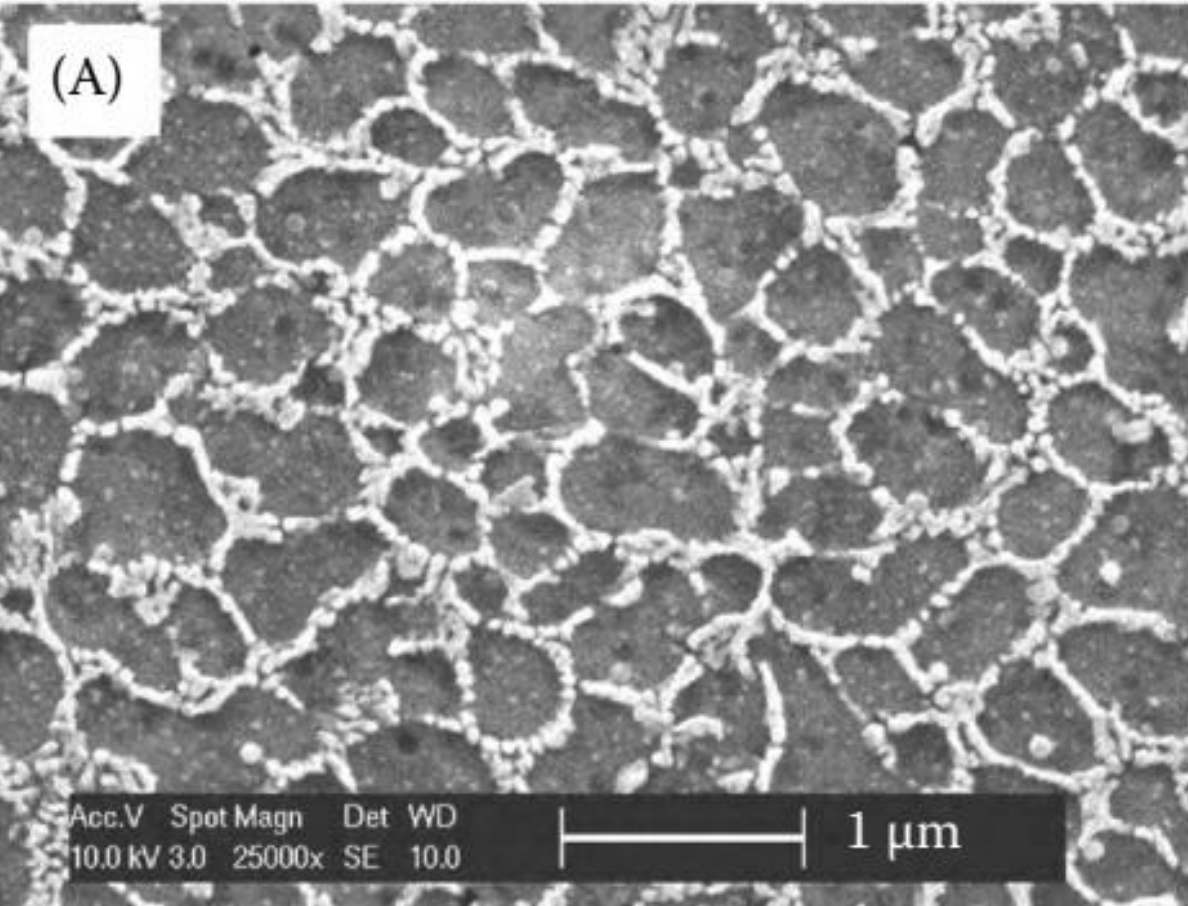
ساختار ستونی

- جبهه انجماد صفحه‌ای پایدار
- فلزات خالص یا کم آلیاژ (تیتانیوم، تانتالیوم، تنگستن)
- تشکیل دانه‌های بزرگ و ستونی

ساختار سلولی ریز

- جبهه انجماد صفحه‌ای ناپایدار
- فلزات متوسط یا پر آلیاژ (فولاد ماریجینگ 18Ni300، AlSi10Mg)
- تشکیل دانه‌های سلولی ریز

ساختار قطعات SLM



- دندریتهای Al به همراه صفحات درشت Si در قطعه ریخته‌گری
- ساختار ریزدانه (فاز یوتکتیک با ذرات ریز Si در اطراف سلول Al) در قطعه SLM
- خواص مکانیکی بهتر SLM نسبت به قطعه ریخته‌گری

FIGURE 3.27 Comparison of the microstructure of AlSi10Mg after (A) SLM⁶⁵ and (B) casting.⁶⁷ Notice the difference in scale.

تیتانیوم

• امکان تشکیل فاز مارتزیت α' به دلیل سرد شدن سریع

از فاز β

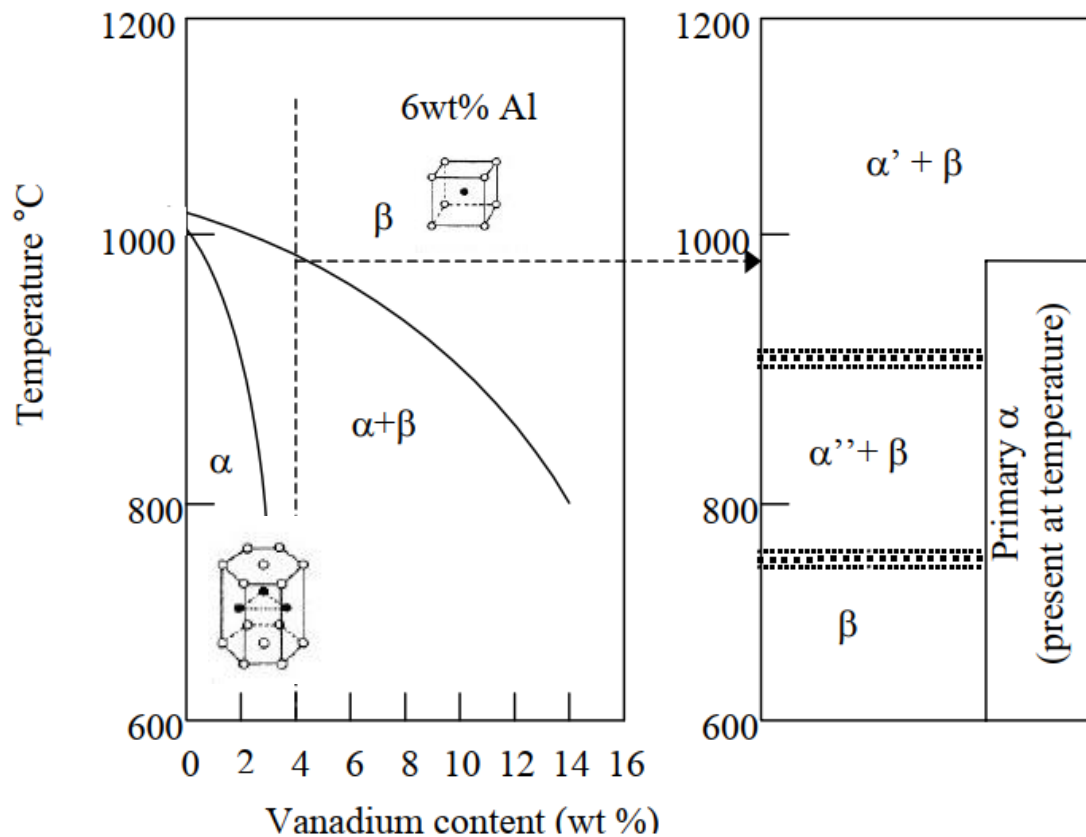


Figure 4.2.1. A schematic illustration of microstructures occurring in Ti-6Al-4V after quenching from different temperatures [5,8,9,10].

تیتانیوم

تشکیل مرز دانه‌های فاز β همراه با صفحات درشت بین دانه‌های α ناشی از عملیات HIP (کاهش استحکام کششی و تنش تسلیم، افزایش شکل‌پذیری و بهبود همسانگردی با تشکیل دانه‌های هم محور)

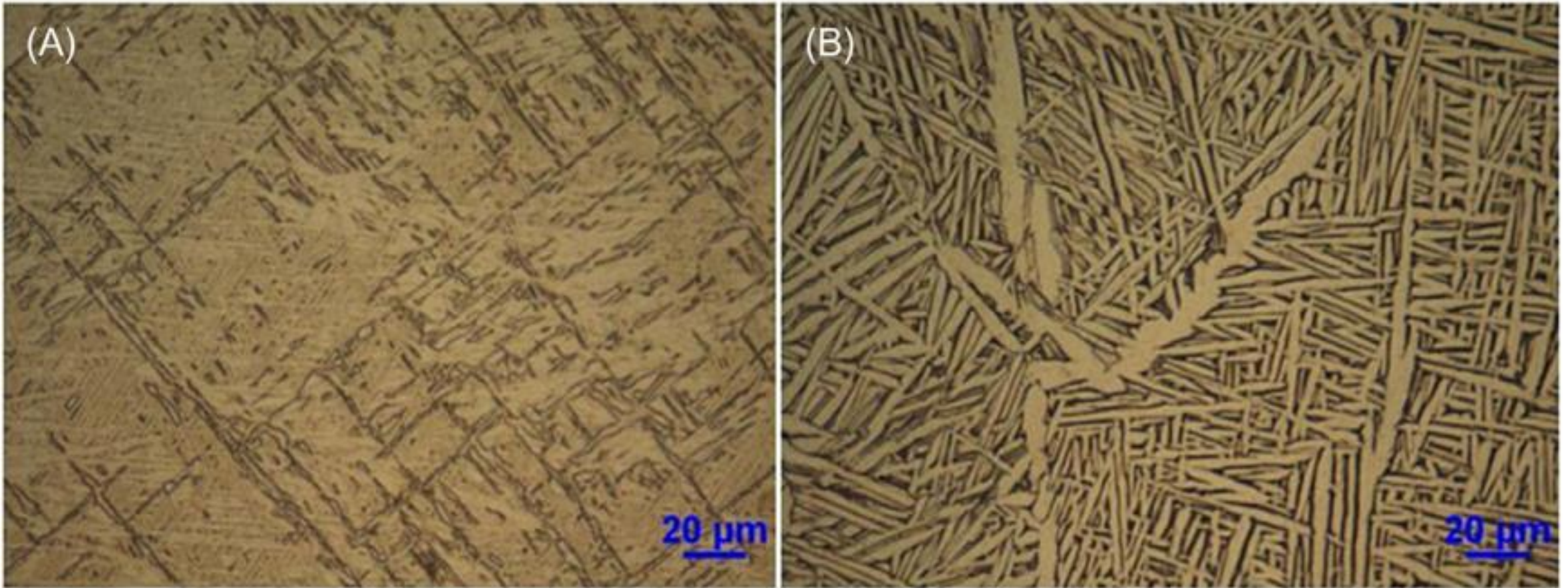
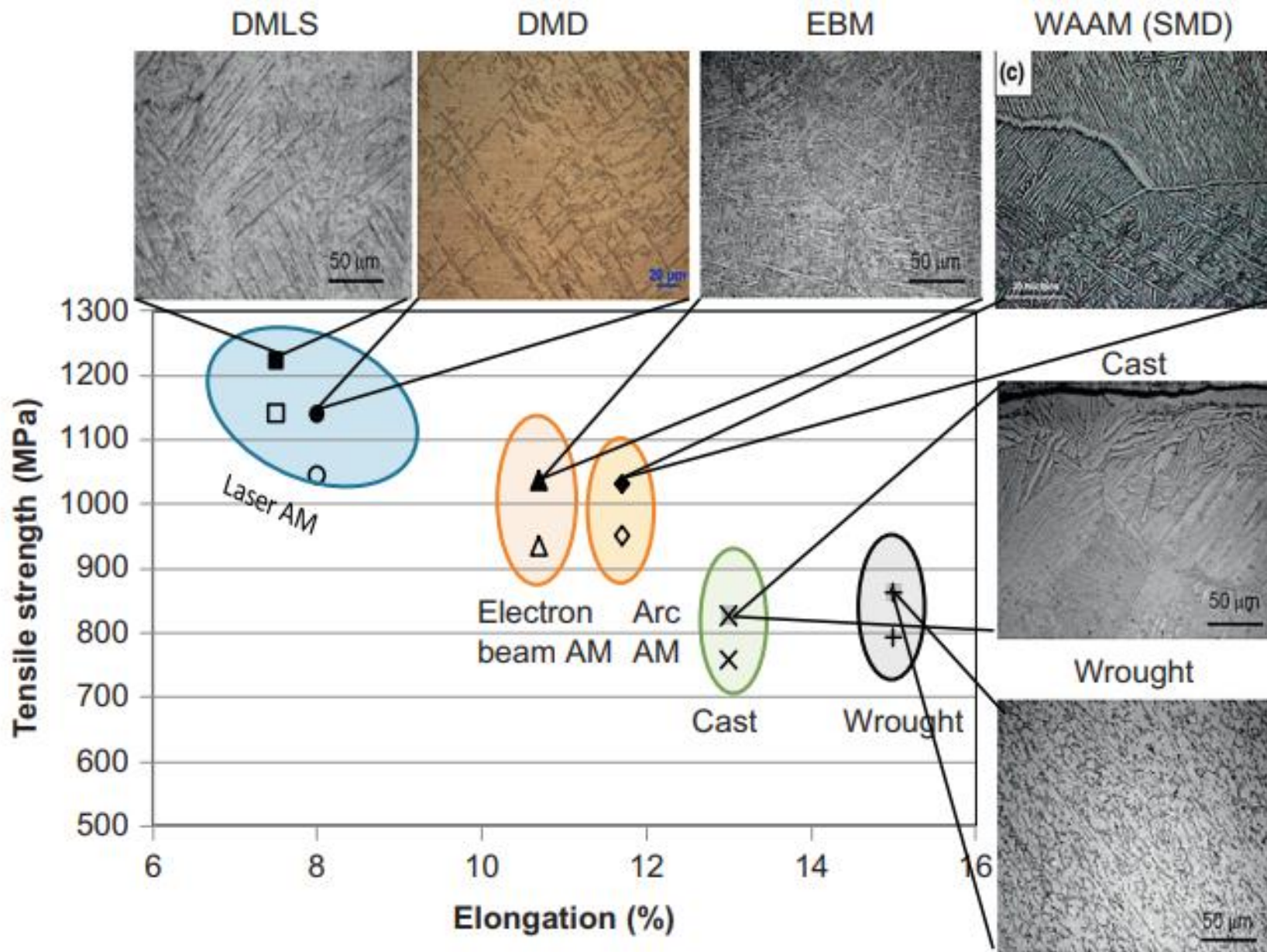


Figure 4.3 Microstructure of DMD built Ti-6Al-4V: (A) as deposited condition and (B) use of HIP and aged as per AMS 4999A. Source: Courtesy of DM3D Technology.

تیتانیوم



- تشکیل فاز مارتزیت α' در روش‌های DMLS و DMD
- تشکیل فاز مارتزیت α/β در روش‌های EBM و SMD
- ساختار درشت دانه‌تر در روش‌های ریخته‌گری و فرم‌دهی

Figure 4.9 Room temperature tensile behavior of AM Ti-6Al-4V alloy produced using various AM technologies and their comparison with cast and wrought material properties.^{1,7,12-14} Typical microstructures are also included for comparison. Closed and open symbols represent UTS and yield strength respectively.

آلیاژی سازی (تیتانیوم)

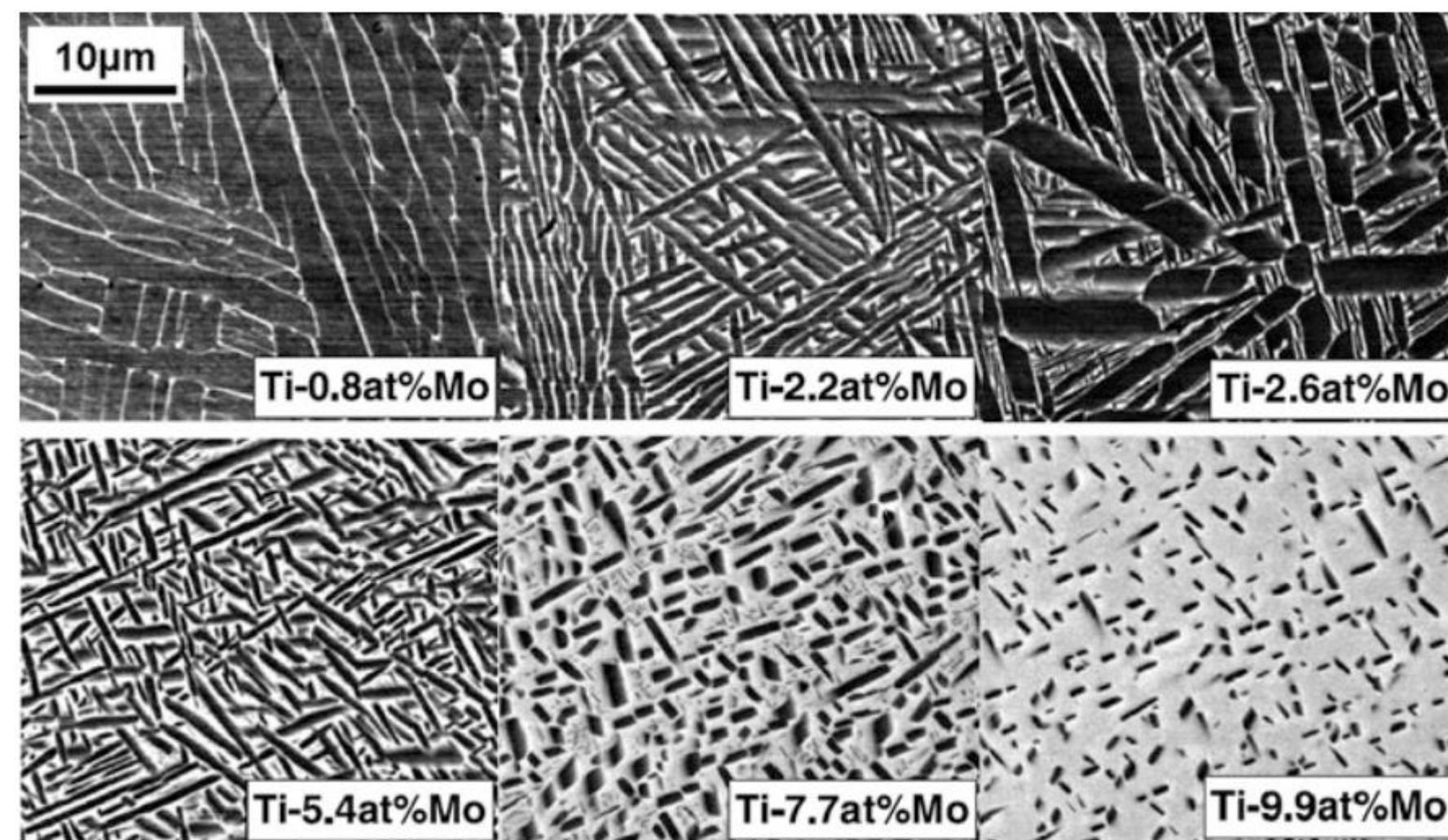


Fig. 2.8 Microstructures of LMD-processed Ti-xMo graded alloy with progressively increasing Mo contents, see Ref. [45]

- امکان تولید مواد گرادیانی با روش DMD
- تولید ماده Ti-xMo (0.8% - 9.9%)

آلیاژسازی (تیتانیوم)

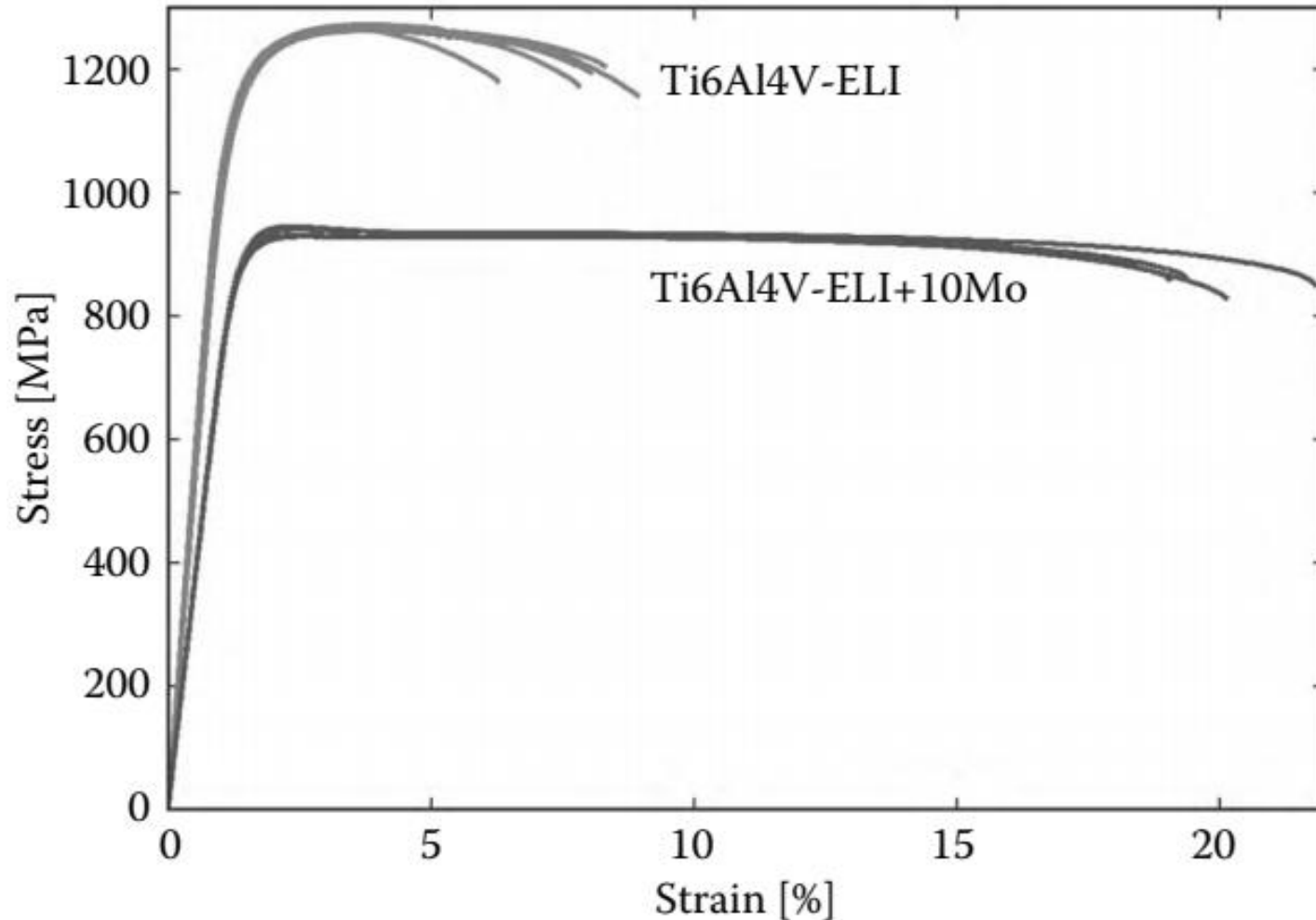


FIGURE 3.38 Comparison of the mechanical properties of Ti6Al4V-ELI and Ti6Al4V-ELI mixed with 10 wt% Mo.⁷⁷

- امکان فرآوری سریع و آسان ترکیب پودرهای مختلف در روش‌های بستر پودری
- اثرات افزودن مولیبدن بر خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیوم ۴-۶
- Mo عنصر پایدار کننده فاز β بوده و از تشکیل مارتزیت α' جلوگیری می‌کند.

آلیاژسازی (آلومینیوم)

- یکی از راهکارهای کاهش تمایل به ترک و یا حذف ترک، تغییر ترکیب عناصر است.
- مثلاً افزودن عنصر سیلیسیوم (۴ درصد) به آلومینیوم ۷۰۷۵ سبب حذف ترک شده است (علت کاهش ویسکوزیته، اندازه دندریت و جدایش آلیاژ است).

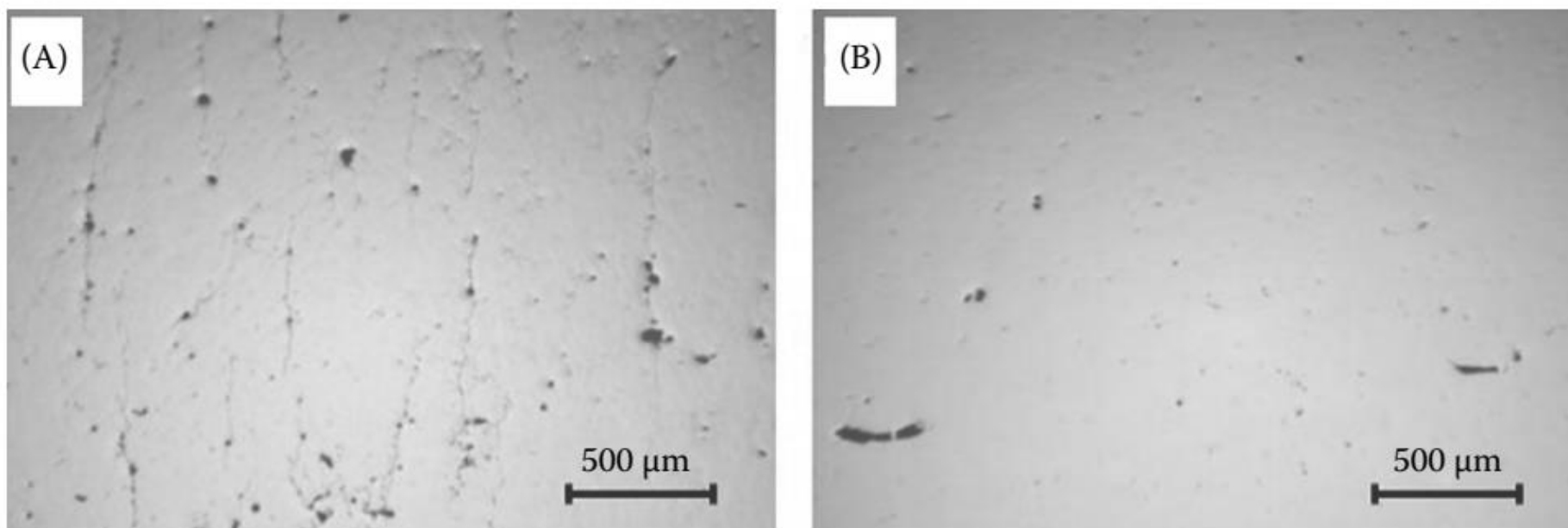


FIGURE 3.39 Side views of (A) Al7075 and (B) Al7075 + 4 wt% Si produced via SLM. The cracks are eliminated by the addition of Si.

خواص متالورژیکی پلیمرها

- شکست ترد مواد پلیمری
- کلوخه‌ای شدن ذرات تقویت کننده
- حفرات ناشی از پرینت

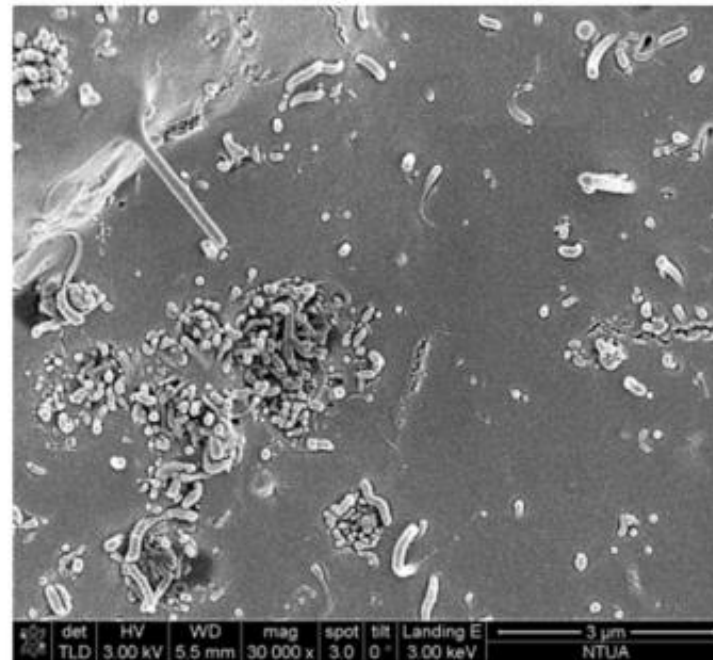
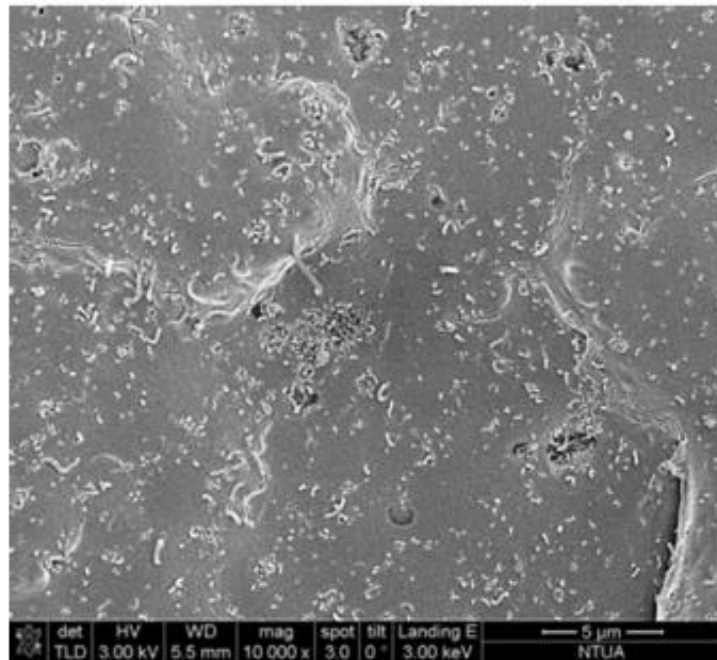
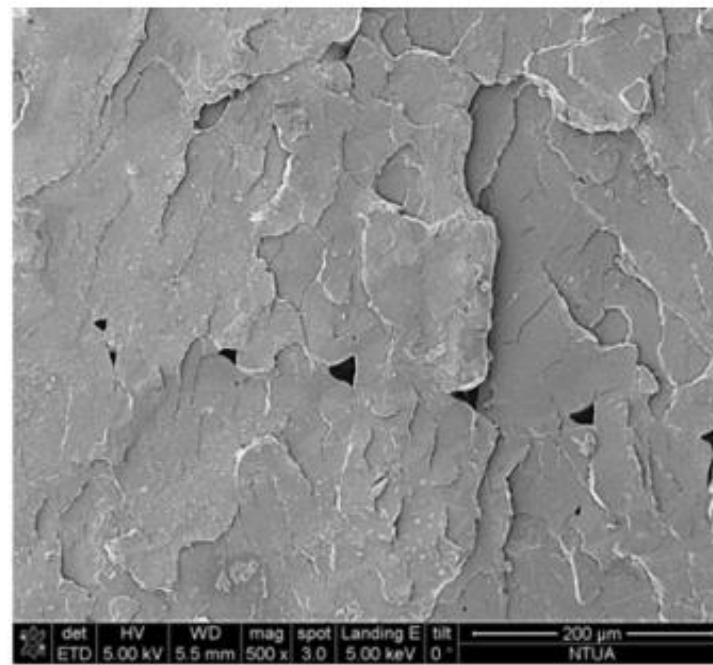
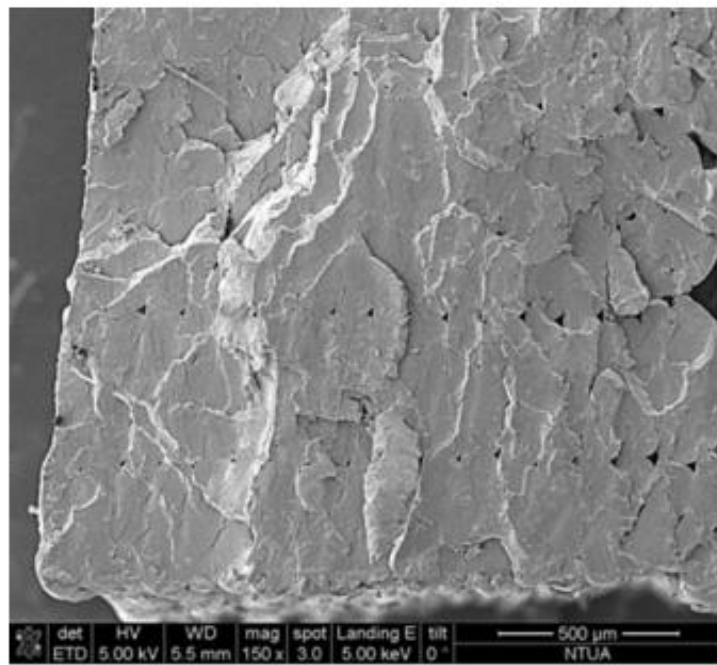


Fig. 3. Types of void defects at different scales in polymer matrices, introduced by the FDM process (top left, right) and nanoparticle agglomeration (bottom left, right) respectively.

خواص متالورژیکی پلیمرها

- شکست ترد ماده PEEK
- حفرات بین لایه‌ای و بین مسیره‌ها

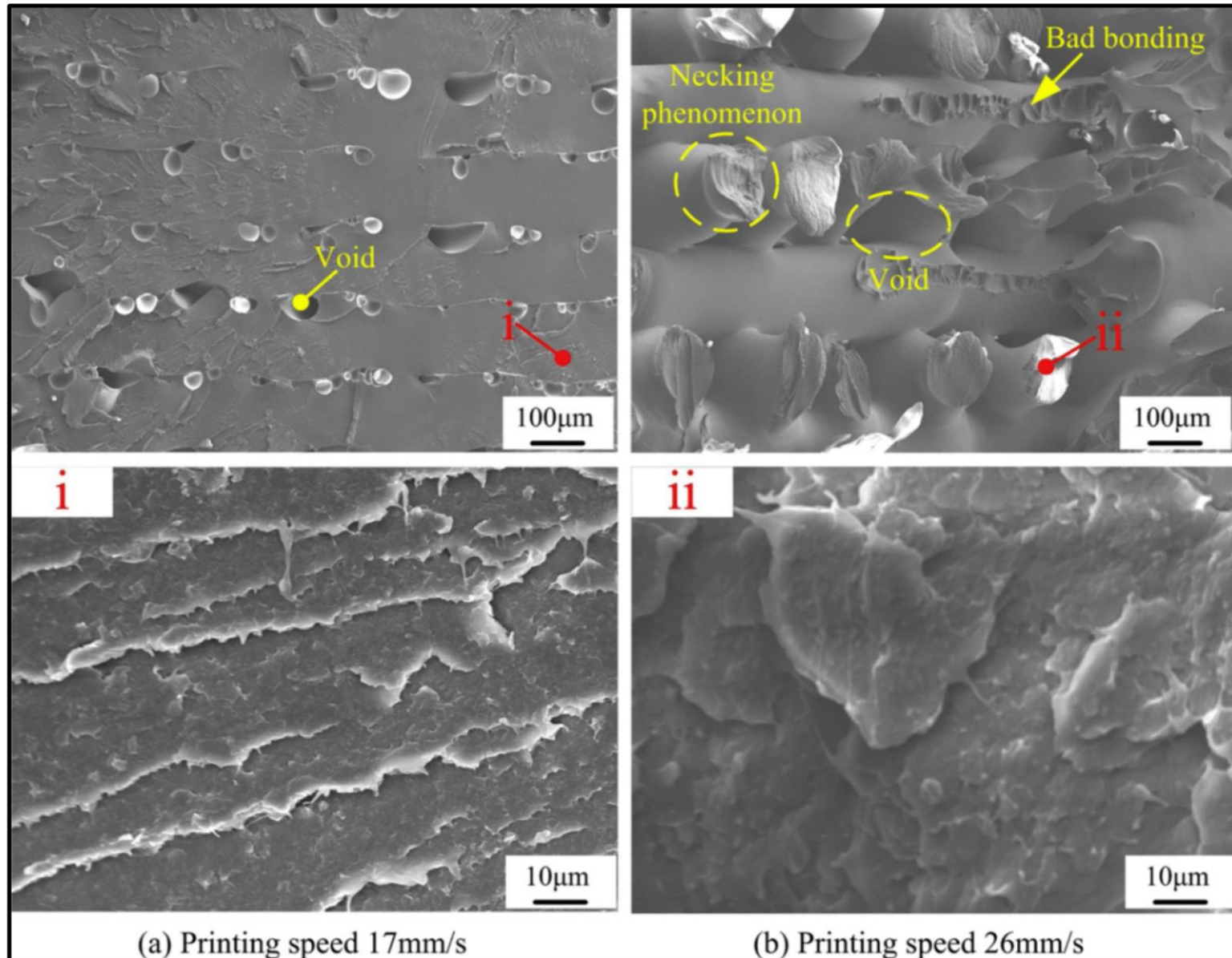


Figure 12. Representative SEM micrographs of the fracture surfaces of PEEK parts printed at different printing temperatures (a) at 380 °C (b) at 440 °C. A and B indicate voids between layers and a void between the infill filaments [84].

خواص مکانیکی

- استحکام بالاتر و شکل پذیری کمتر نمونه SLM به دلیل سرعت سرد شدن زیاد مواد در این روش است.

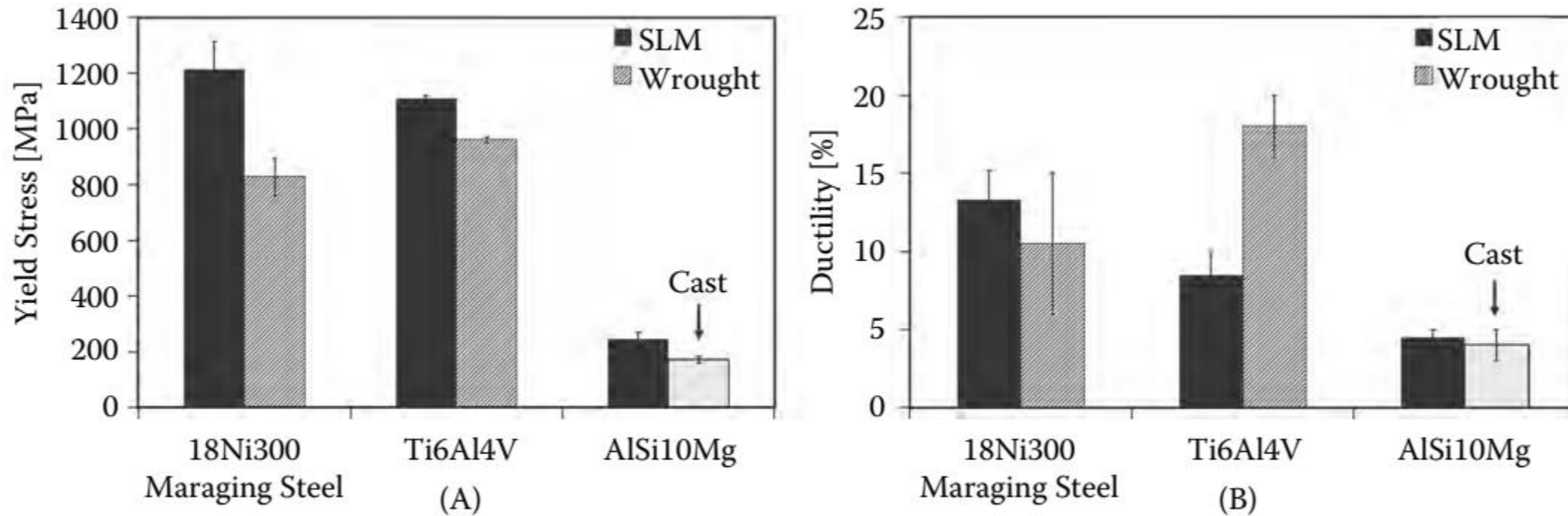


FIGURE 3.30 Comparison of the mechanical properties of 18Ni300, Ti6Al4V-ELI, and AlSi10Mg produced via SLM and in the wrought or cast condition.^{59,68,70}

خواص مکانیکی

• انجماد جهت دار و تشکیل بافت ترجیحی

در روش SLM

• حداکثر گرادیان حرارتی در جهت

ساخت

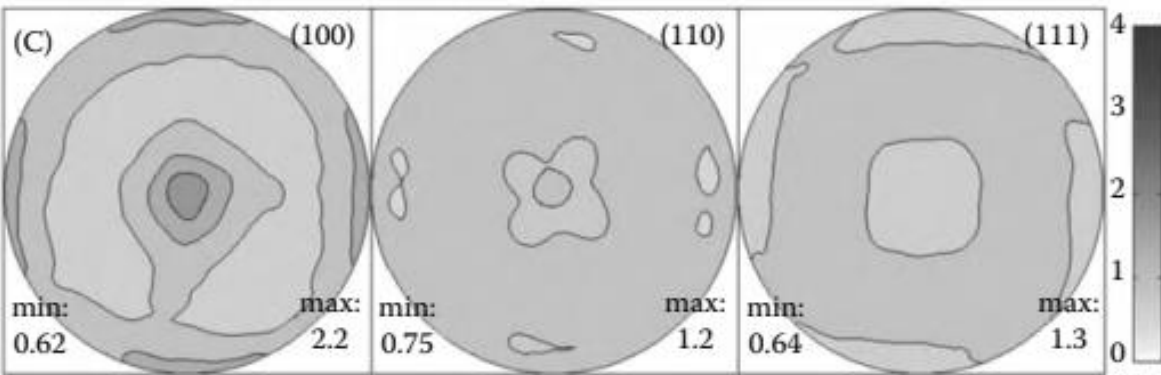
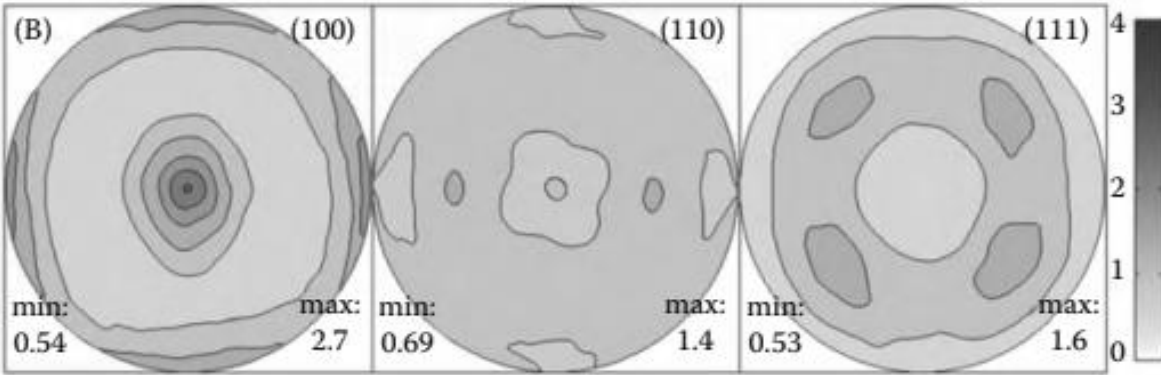
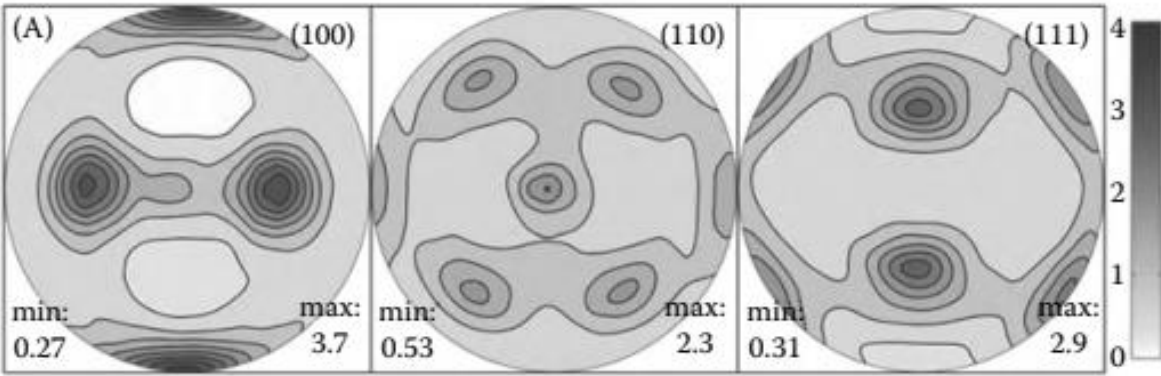
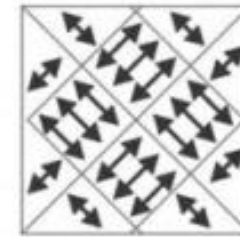
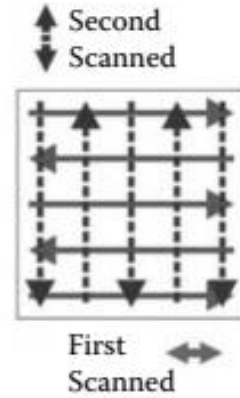
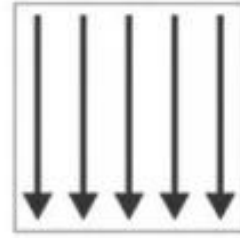
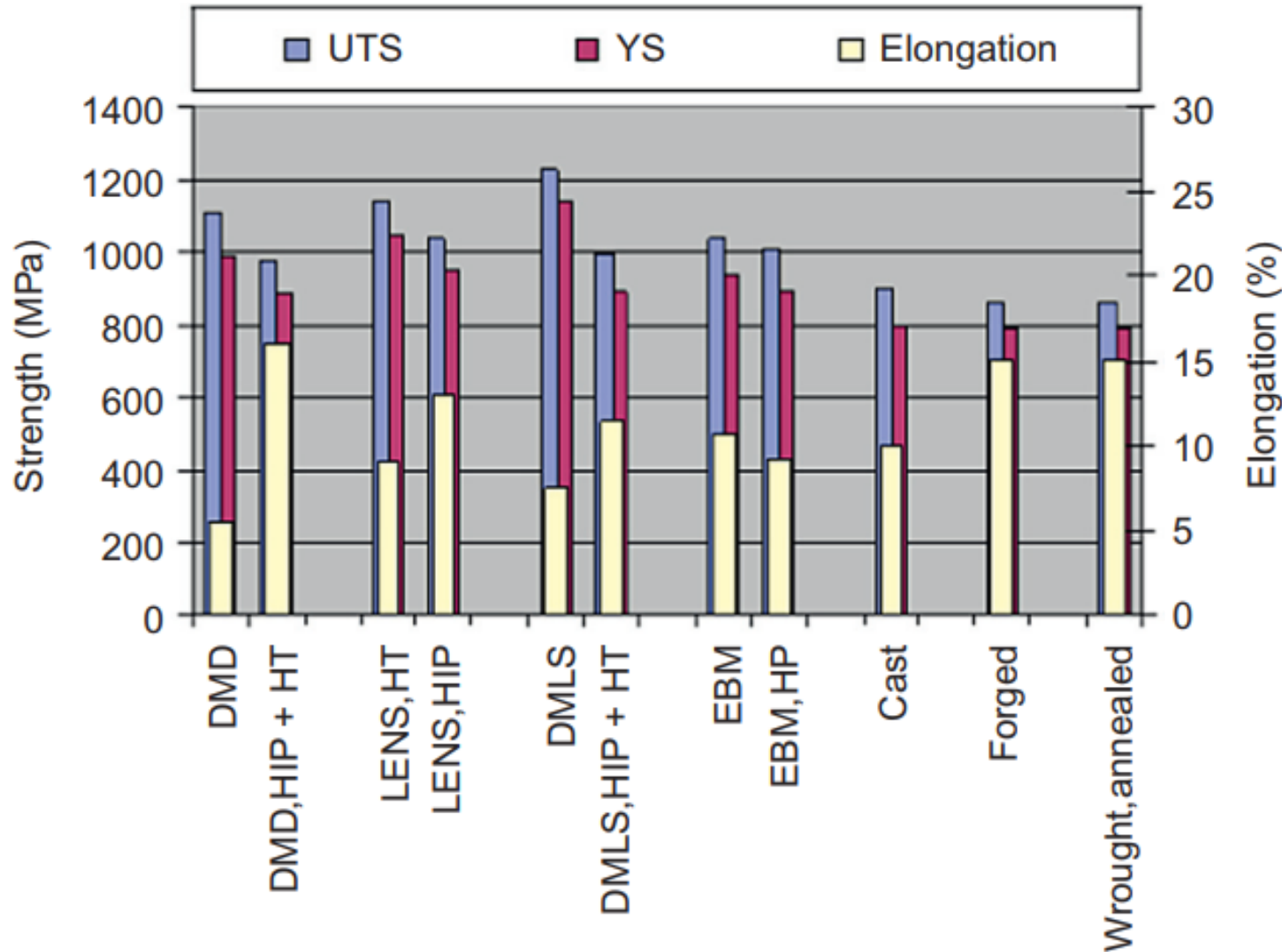


FIGURE 3.29 Pole figures of AlSi10Mg produced via SLM, for different scanning strategies: (A) Unidirectional scanning, no rotation between layers; (B) bidirectional scanning, 90° rotation between layers; and (C) chessboard (island) scanning. Each subsection is scanned using bidirectional scanning. (Adapted from Thijs, L. et al., *Acta Mater.*, 61(5), 1809–1819, 2013.)

خواص مکانیکی



• انعطاف پذیری کمتر در روش

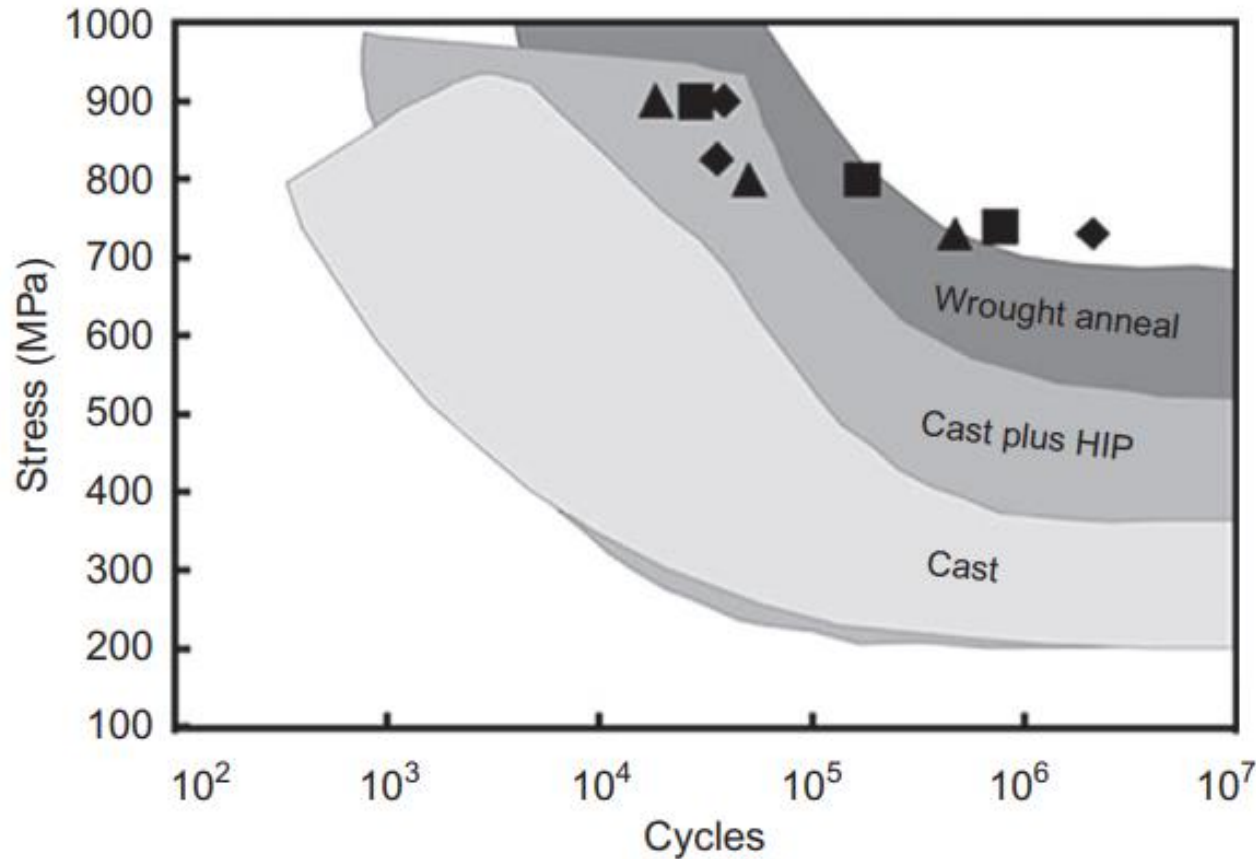
DMD و DMLS به دلیل

تشکیل فاز مارتزیت α'

است.

Figure 4.4 Tensile strength, yield strength, and elongation of Ti-6Al-4V alloy built using various AM processes. DMD: direct metal deposition,¹ LENS: laser engineered net shaping,⁶ DMLS: direct metal laser sintering,⁷ EBM: electron beam melting,⁷ HIP: hot isostatic pressing, HT: heat treatment.

خواص مکانیکی



- برای اجرای آزمون خستگی، نمونه باید ماشینکاری شود و سطح نمونه پرداخت باشد.
- رفتار خستگی نمونه ساخت افزایشی در حد نمونه‌های کار شده و ریخته‌گری همراه با HIP است.

Figure 4.5 Comparison of room temperature fatigue properties of AM fabricated Ti-6Al-4V and conventionally fabricated Ti-6Al-4V. ■, ◆ and ▲ represent properties in the three orthogonal directions: x, y, and z, respectively. Source: Titanium Development Association, Dayton, Ohio (now The International Titanium Association, <http://www.titanium.org>).

خواص مکانیکی

- هر فرایندی که خواص سطحی بهتری ایجاد کند منجر به تولید قطعه با خواص خستگی بهتر می شود.

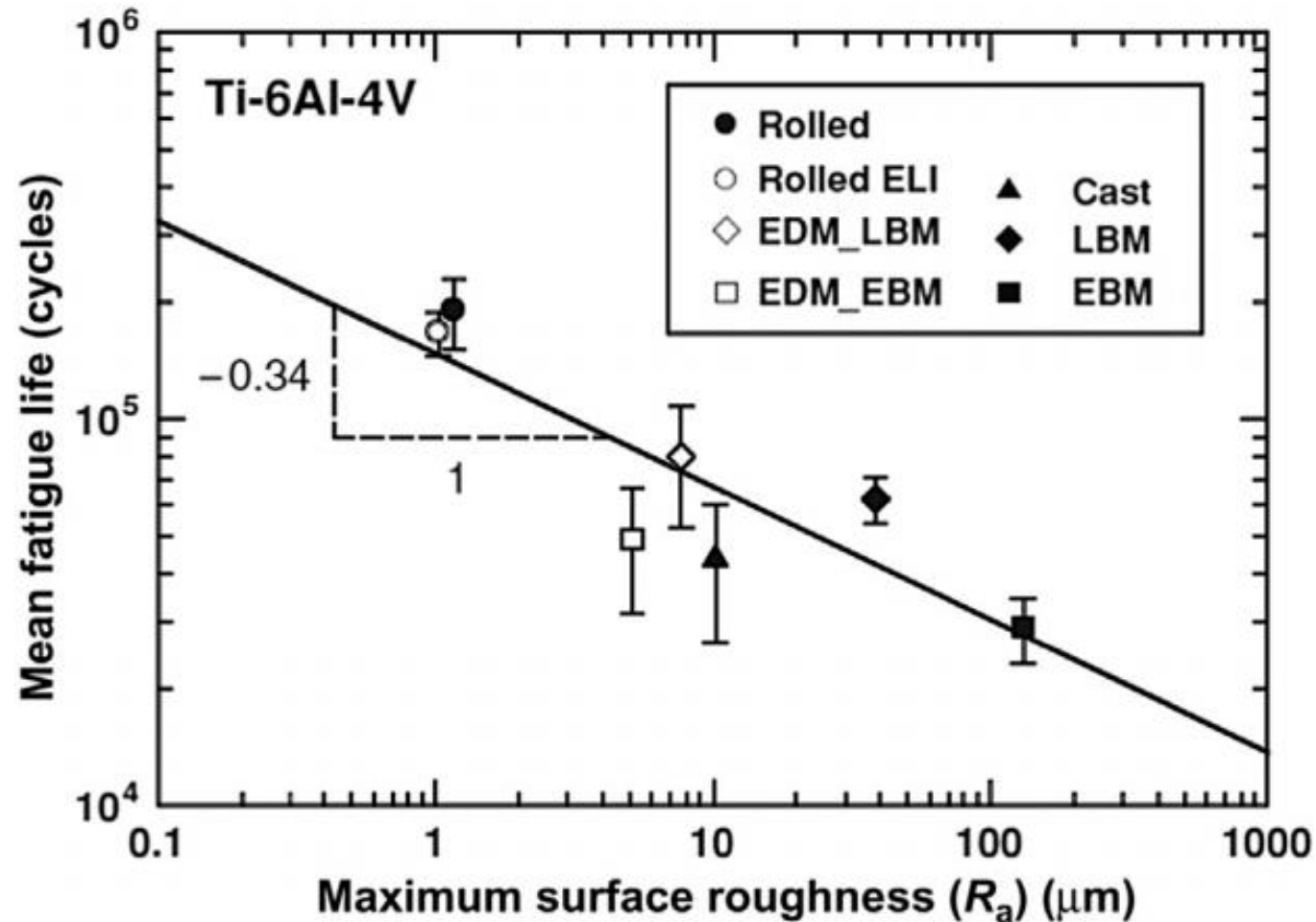


Figure 4.6 Effect of surface roughness on fatigue life of AM manufactured Ti-6Al-4V alloy.¹¹

خواص مکانیکی

اثر جهت ساخت نمونه بر خواص مکانیکی قطعات پلیمری و کامپوزیتی

TABLE 2.4

Mechanical Properties of Thermoplastic Composite Tensile Bars

Material	Orientation	Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
PEEK	Parallel	1.7	59	3.3
	Perpendicular	1.8	88	5.3
PEEK + 30 wt.% carbon fiber	Parallel	9.4	257	3.0
Polycarbonate	Parallel	1.1	64	8.7
	Perpendicular	3.6	124	3.6
Polycarbonate + 30 wt.% glass fiber	Parallel	3.0	106	3.8
	Perpendicular	1.0	46	5.6
PMMA	Parallel	1.3	23	1.4
	Perpendicular	1.5	61	5.8

Source: Peng, J. et al., *Compos. A: Appl. Sci. Manufact.*, 30, 133–138, 1999.

Note: Instron model 1011; strain rate: 5 mm s⁻¹; load cell: 4448 N; vertical specimen loading; wedge-action type grip.

PEEK, poly(ether ether ketone); PMMA, poly(methyl methacrylate).

خواص مکانیکی

- آزمایش نمونه کامل به منظور بررسی عملکرد نمونه در شرایط استفاده واقعی

- میزان کرنش، جذب انرژی و حداکثر تنش قابل تحمل

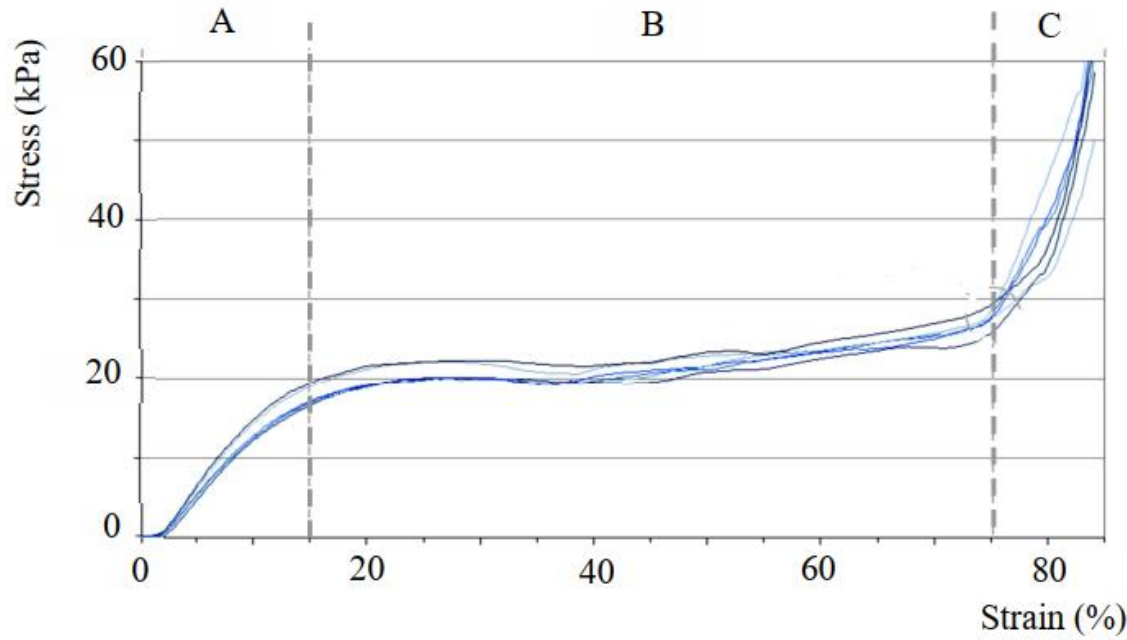


Figure 4. Compressive behavior of the straight strut samples

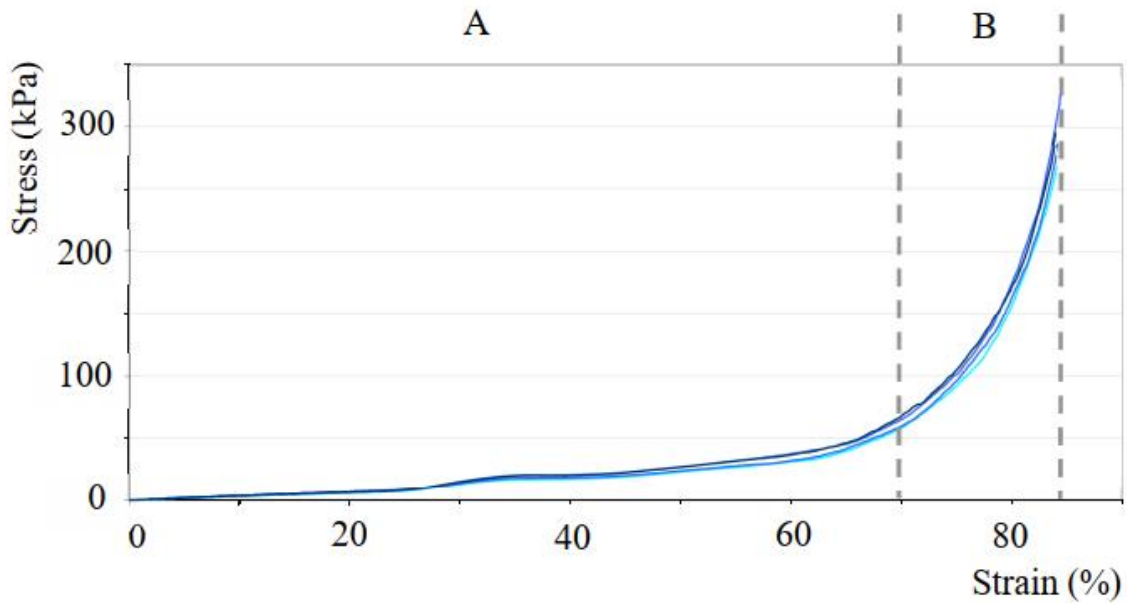
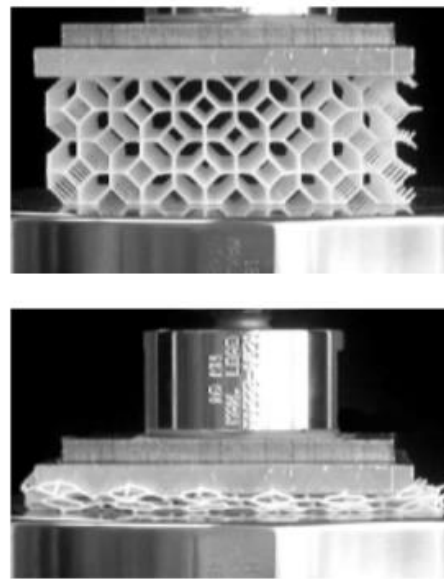
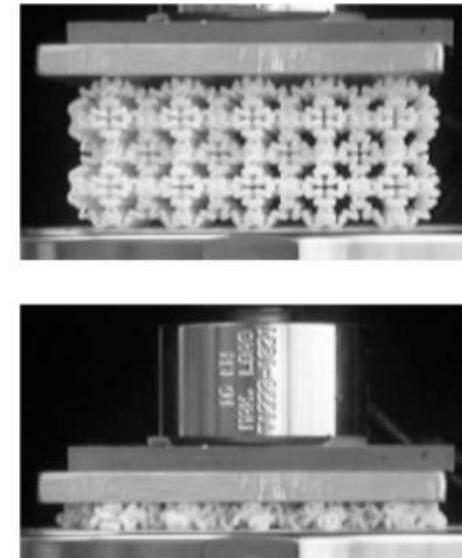


Figure 5. Compressive behavior of the helical strut samples



تشکیل حفره

- تشکیل حفره در اطراف پودرهای ذوب نشده
- افزایش این حفرات با افزایش سرعت روبش (دلیل: کاهش دمای فرآیند، تشکیل حوضچه کوچک و نرخ سرد شدن زیاد که در نتیجه تمام ذرات پودر ذوب نشده و فضای بین ذرات پر نمی‌شود).

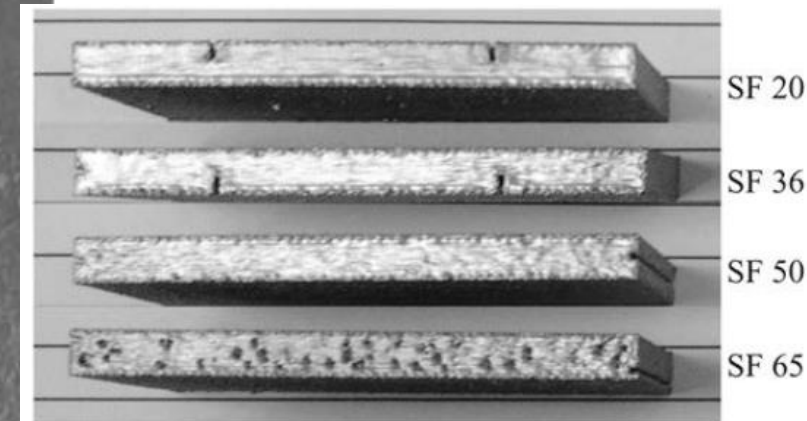
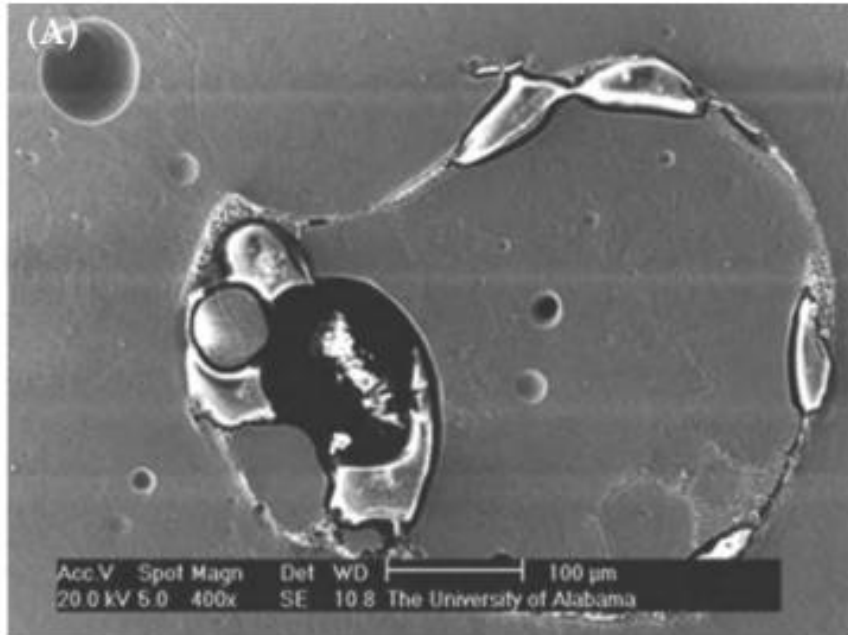
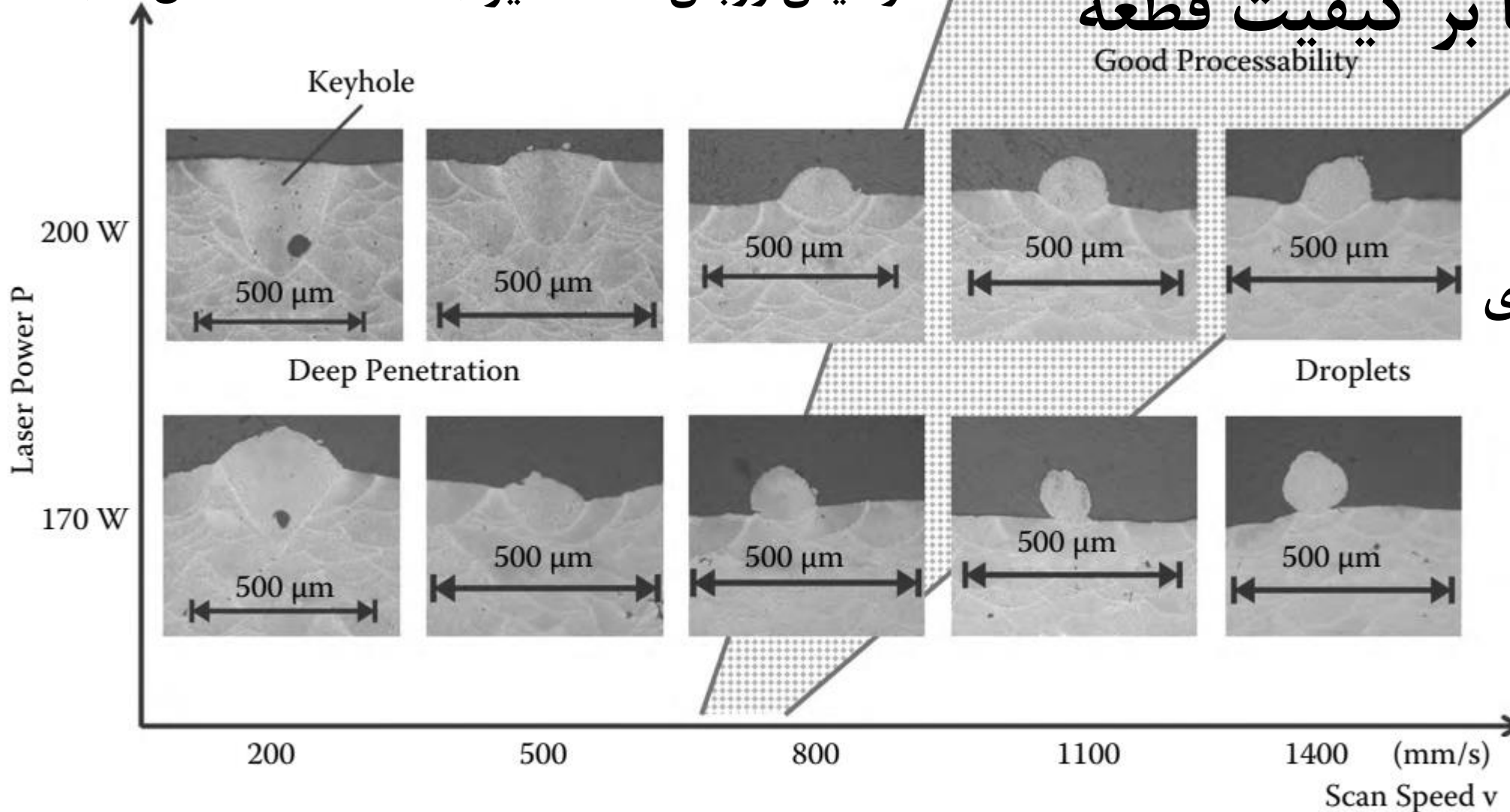


FIG. 1. EBAM parts built with different SFs.

FIGURE 7.21 SEM micrograph showing porosity and unmelted powder in SF 65 sample: (A) unmelted powder, and (B) pores.

آزمایش روبش تک مسیر (Single Track Scan)

اثر پارامترها بر کیفیت قطعه



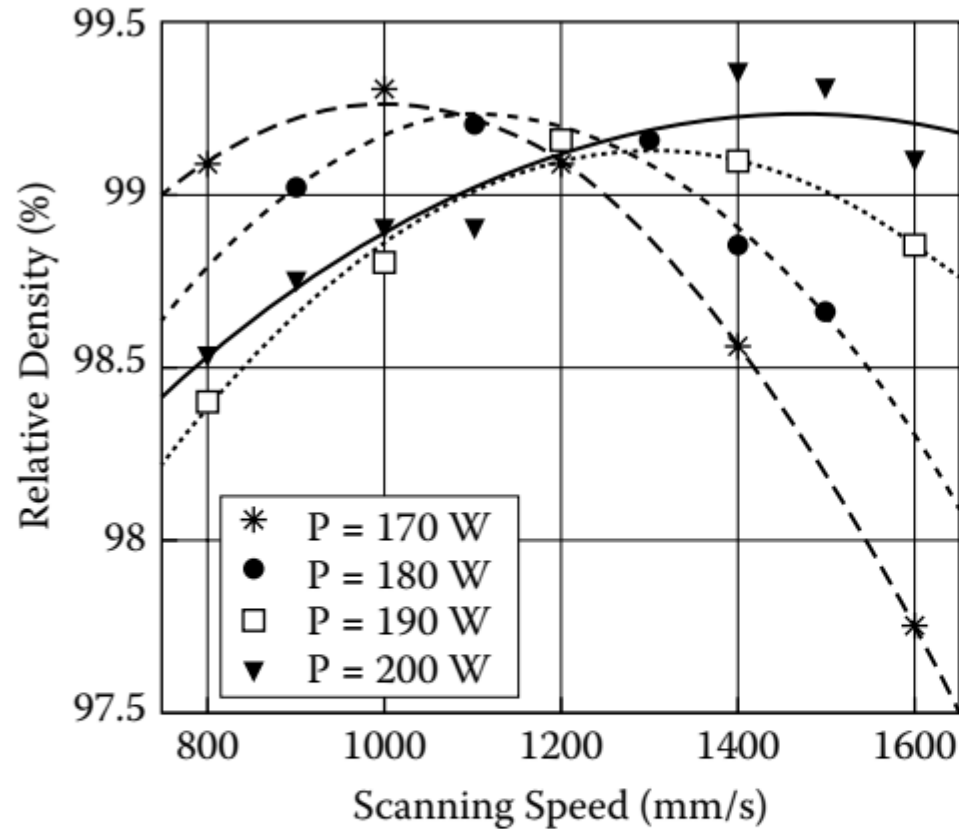
پنجره فرایند بر

اساس پارامترهای

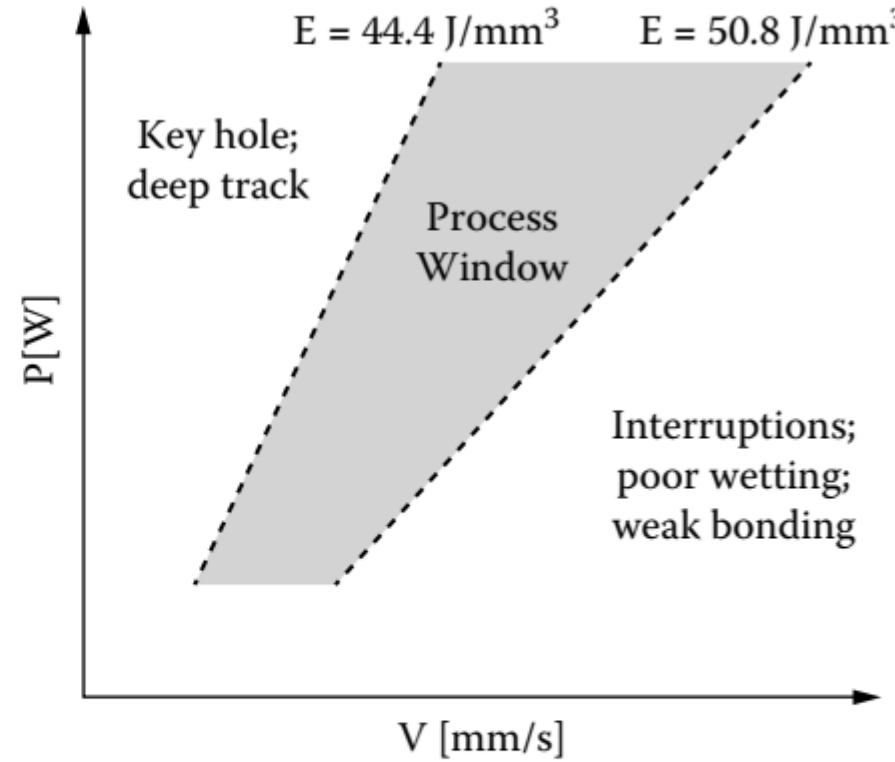
کلیدی

FIGURE 3.22 Process parameter map for single track scans of AlSi10Mg. The process window is indicated by hatch lines.⁵⁷

اثر پارامترها بر چگالی قطعه



(A)



(B)

FIGURE 3.23 (A) Relative density of AlSi10Mg parts for different combinations of laser power and scanning speed (the scan spacing and layer thickness are set at $105 \mu\text{m}$ and $30 \mu\text{m}$, respectively), and (B) the corresponding process window.⁵⁷

اثر پارامترها بر چگالی قطعه

جمع بندی:

- با افزایش توان لیزر و کاهش سرعت روبش: افزایش عمق نفوذ در لایه پایین، کاهش ارتفاع لایه، تبخیر مواد بدلیل افزایش انرژی ورودی و تشکیل سوراخ کلیدی (Key hole)
- کاهش توان لیزر و افزایش سرعت روبش: تر شوندگی ضعیف و تشکیل لایه به صورت ذرات کروی شکل
- پنجره ایده آل فرایند (محاسبه چگالی انرژی): P توان لیزر، v سرعت روبش، s فاصله مسیرهای اسکن و t ضخامت لایه

$$E_{\rho} = \frac{P}{vst}$$

اثر ذوب مجدد بر تخلخل

پنجره فرایند آلیاژ تیتانیوم

- با افزایش چگالی انرژی تخلخل کاهش یافته است.

انرژی ورودی زیاد می تواند منجر به:

- اعوجاج
- توپی شدن
- آلودگی و کف در حوضچه مذاب
- کیفیت سطحی نامطلوب

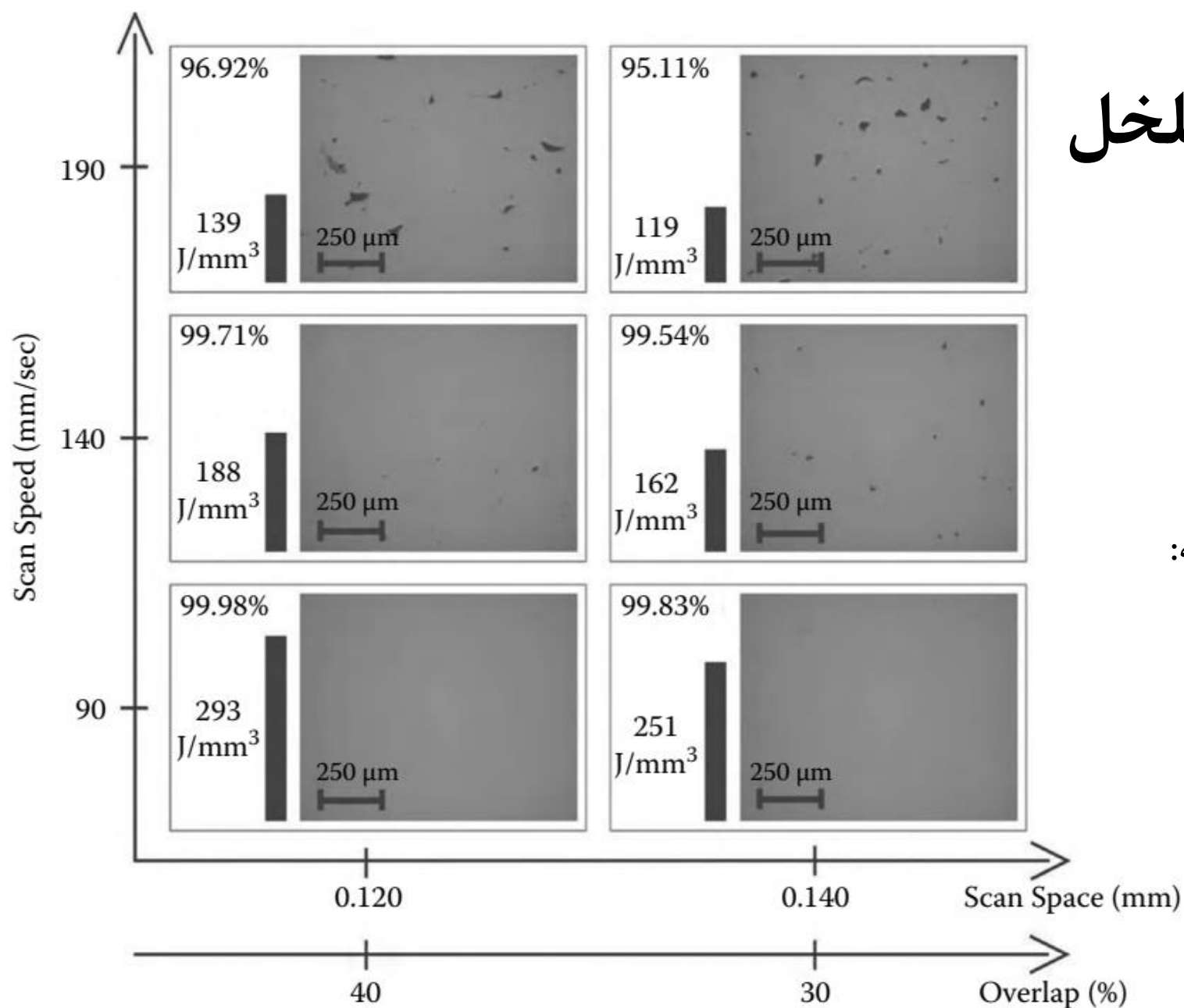


FIGURE 3.24 Results of parameter study for Ti6Al4V (laser power, 95 W).⁸

اکسیداسیون

اکسیداسیون با وجود استفاده از گاز

محافظ (گاز محافظ آرگون، اکسیژن ۰/۱ تا

۰/۳ درصد)

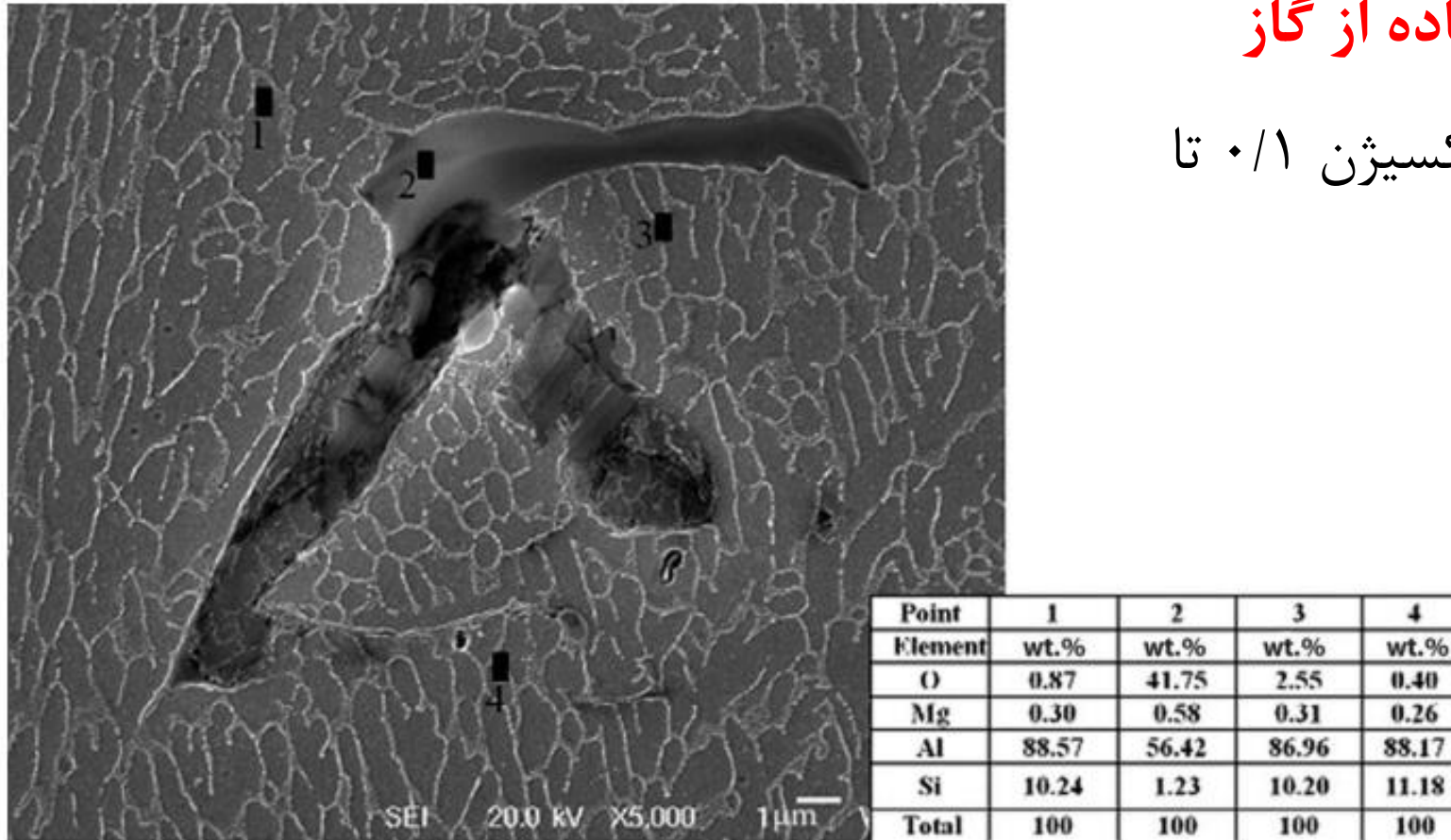
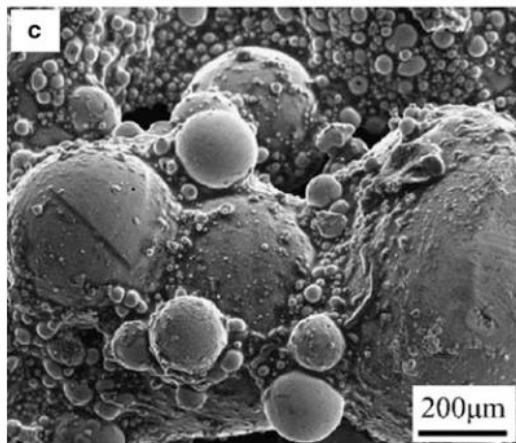
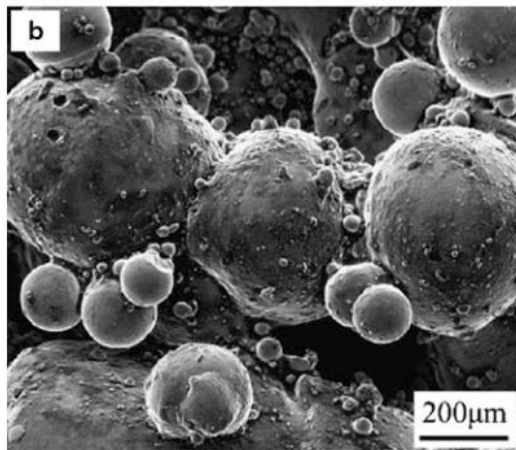
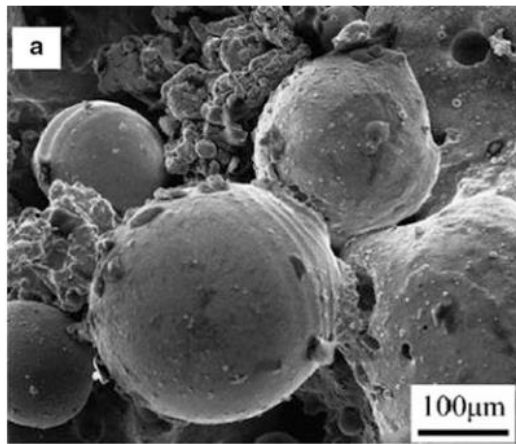


Figure 3.44 Oxide film defect in SLM AlSi10Mg alloy. (From Read, N. et al., *Mater. Des.*, 65, 417–425, 2015.)

عیب توپی شدن

عیب توپی شدن (Balling):



- کاهش انرژی سطحی مسیر اسکن شده توسط لیزر و شکست مسیر به چندین توده مجزا
- باعث ایجاد مسیرهای روبش ناپیوسته و یا اتصال ضعیف بین لایه ای می شود.
- مکانیزمها: ۱- روبش مسیر اولیه روی بستر سرد (گرادیان دمایی بالا)، ۲- سرعت روبش بالا (ناپایداری مواد ذوب شده)، ۳- پاشش ذرات

Fig. 2.20 Balling phenomena occurred during LS of Cu-30CuSn-10CuP powder: a First line scan balling, b Shrinkage-induced balling, c Splash-induced balling, see Ref. [163]

چسبیدن پودر

چسبیدن پودر به مسیره‌های اسکن (کاهش کیفیت سطحی و نیاز به پرداخت و حکاکی شیمیایی)

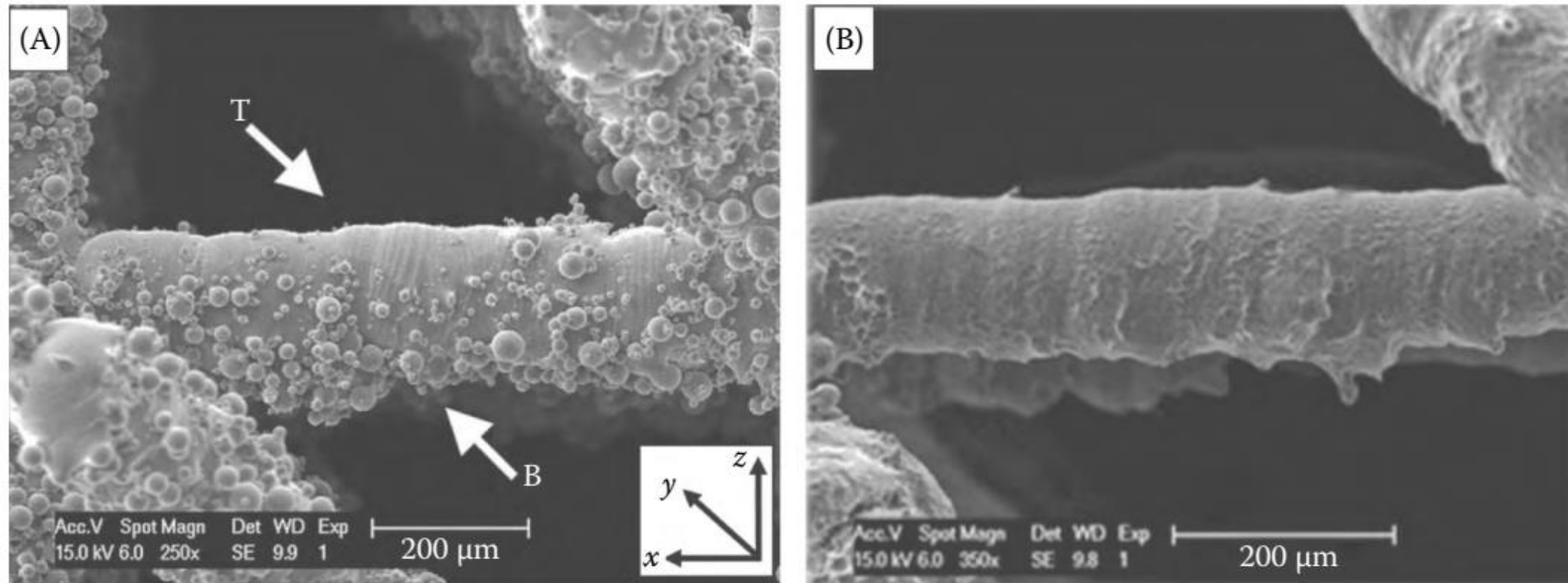


FIGURE 3.37 A typical Ti6Al4V strut (A) after SLM where non-melted powder grains are attached to the top and bottom of the strut, and (B) after chemical etching (with a solution of 0.5 mL HF + 50 g H₂O), and the powder grains have been successfully removed.⁷⁵

انواع حفرات در UAM

تشکیل **حفره** در فرایند UAM: ۱- بین لایه‌ای (زبری سطح ورق، انرژی ورودی ناکافی)، ۲- بین لایه‌ای (انرژی ورودی زیاد و شکست اتصال بین لایه‌های پایین) و ۳- فاصله بین ورق‌ها در یک لایه

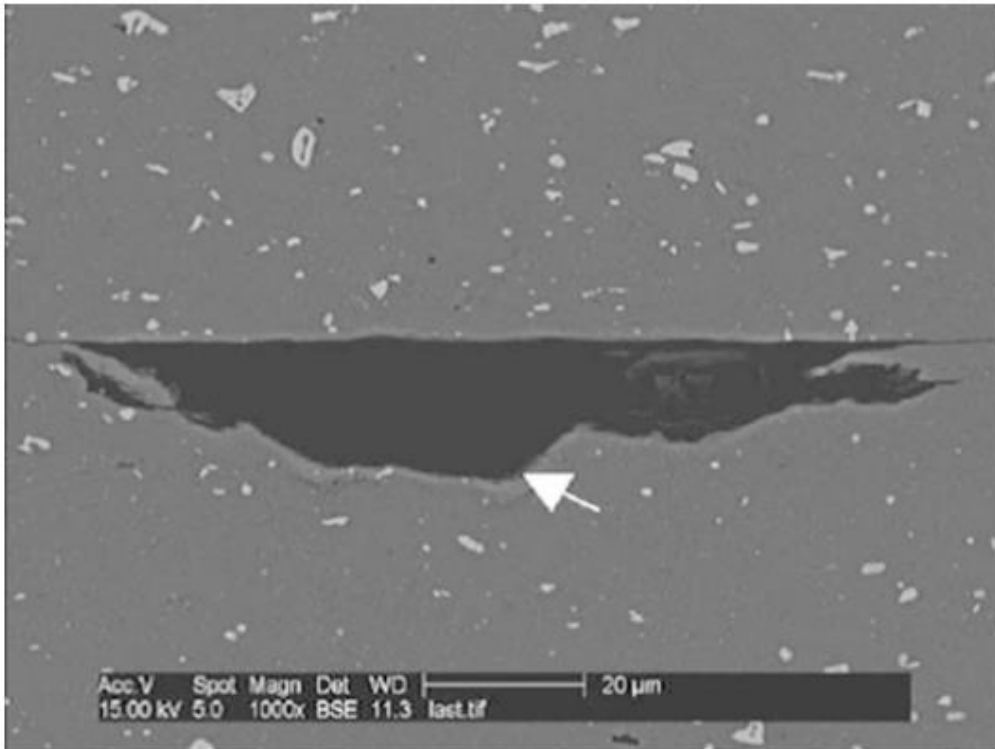


Fig. 9.11 Type-1 UAM defect (arrow indicates location of surface oxides)

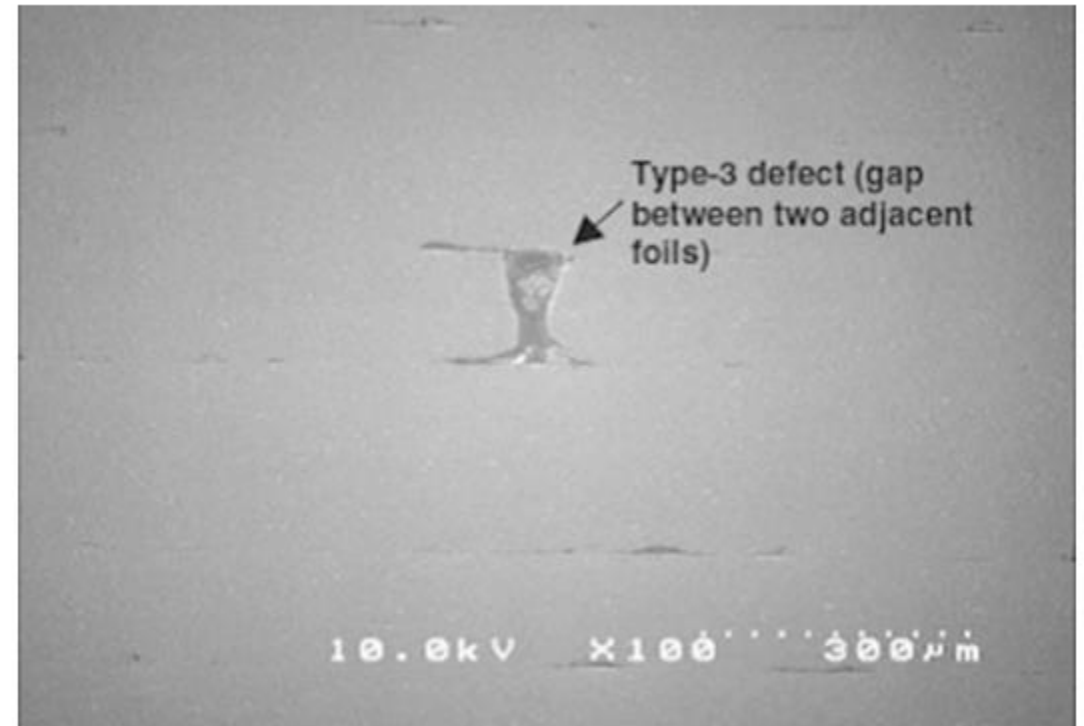
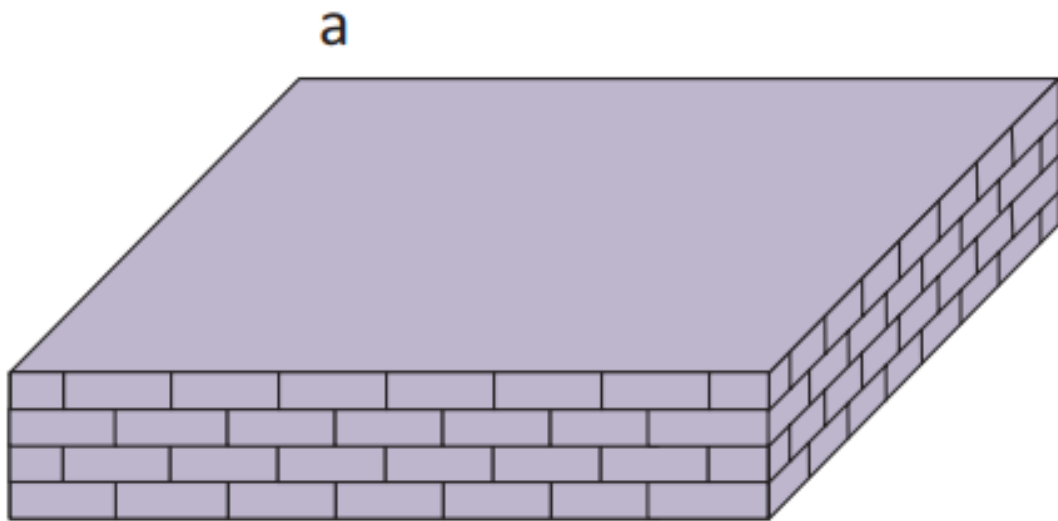


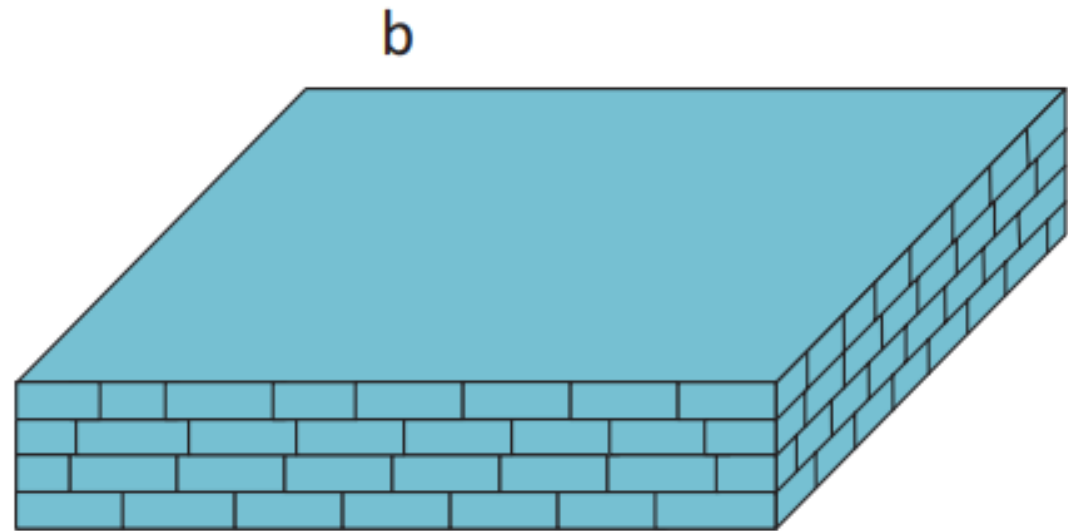
Fig. 9.12 Type-3 defect observed between adjacent foils (Note the morphology of the Type-1 defects between layers indicate that this micrograph is upside-down with respect to build orientation)

انواع حفرات در UAM

راهکارهای کاهش **حفره** در فرایند UAM: ۱- تنظیم فاصله روبش به نسبت عرض ورق، ۲- استفاده از آرایش مناسب، ۳- تنظیم انرژی بهینه



50% Overlap



Random overlap

Fig. 9.13 Schematic illustrating (a) 50% foil overlap and (b) random foil overlap in UAM

انواع پارامترها بر عيوب UAM

- اثرات پارامترهای فرایند بر خواص متالورژیکی قطعات در روش UAM (نیروی عمودی ۲۰ کیلونیوتن)

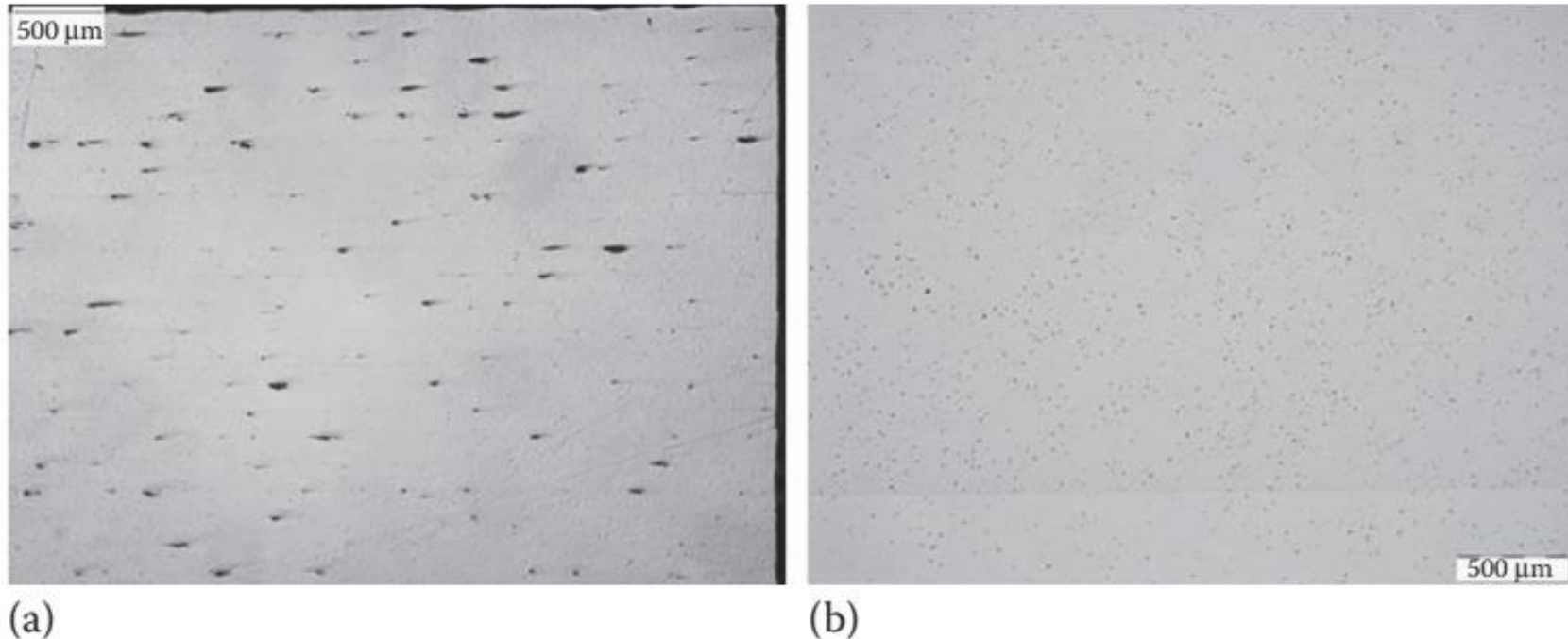


Figure 17.4 (a) Metallurgical section of aluminum 3003 build showing gaps left by 1 kW UAM system and (b) metallurgical section of gapless aluminum 6061 build fabricated with the 9 kW UAM system shown in [Figure 17.3](#).

تولید قطعات چندفلزی در روش UAM

- امکان تولید قطعات چندفلزی در روش UAM به دلیل عدم ذوب و عدم تشکیل ترکیبات بین فلزی ناخواسته

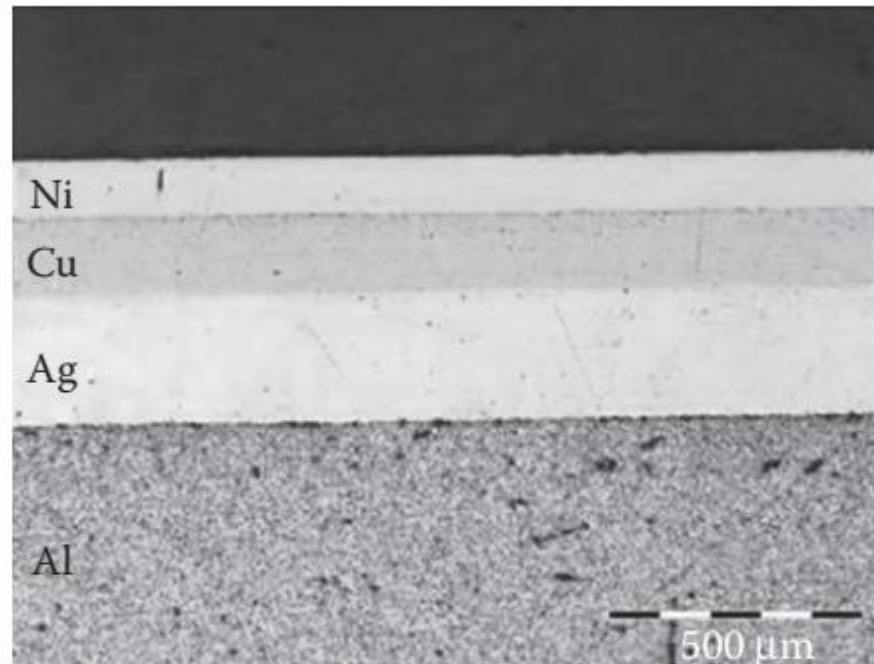


Figure 17.36 Cross section of a multimaterial UAM build including nickel, copper, and silver welded onto an Al 3003 substrate. (From J. Obielodan, A. Ceylan, L. Murr, and B. Stucker, *Rapid Prototyping Journal* **16**(3), pp. 180–188, 2010.)

کامپوزیت های پلیمری الیاف پیوسته



عیوب مؤثر بر خواص مکانیکی

1. حفره گازی

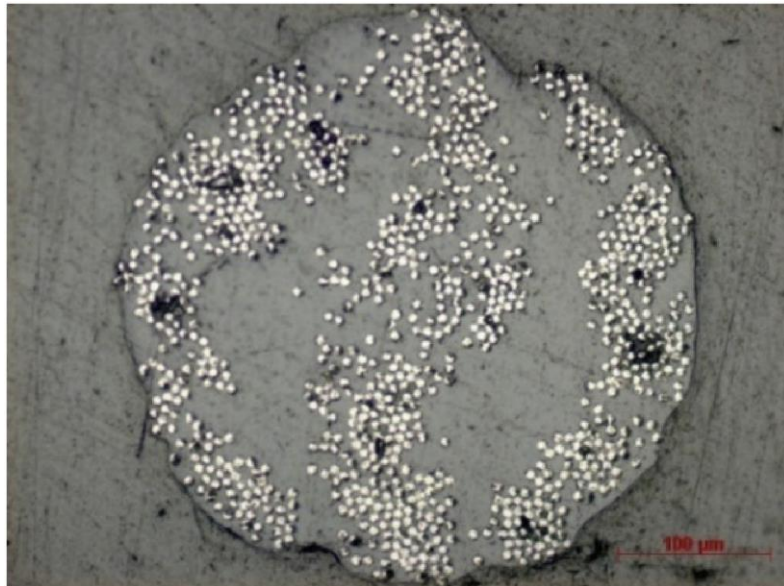
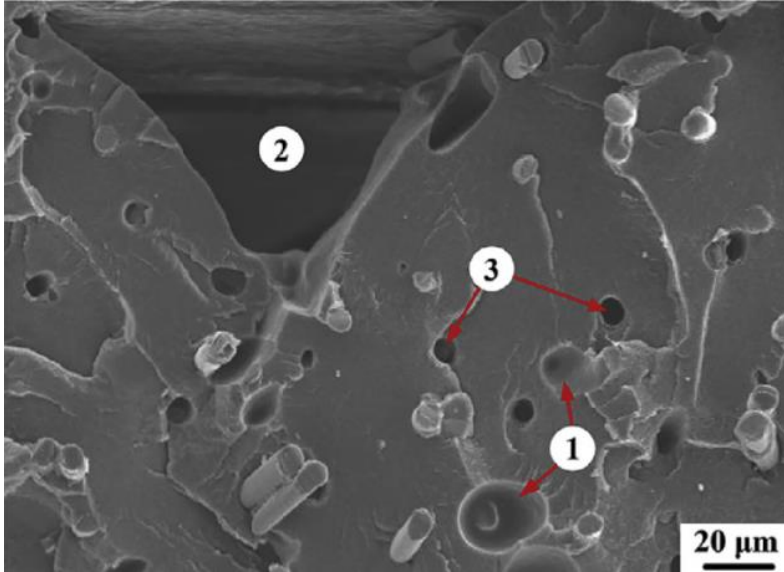
2. حفره بین مسیرها

3. خارج شدن الیاف

• حفره (ماده پایه و پرینت)

• عدم آغستگی مناسب الیاف

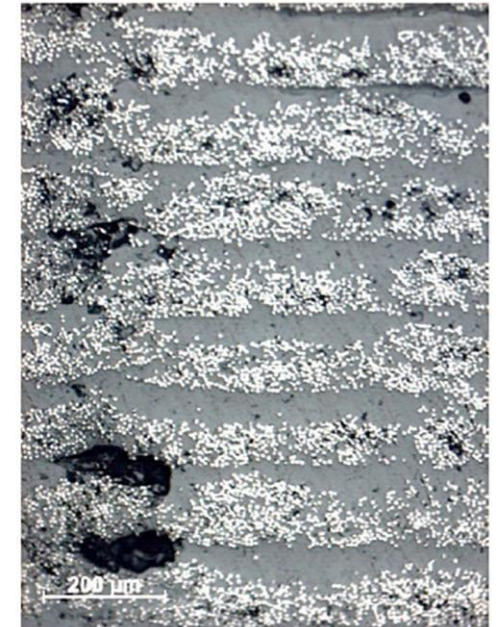
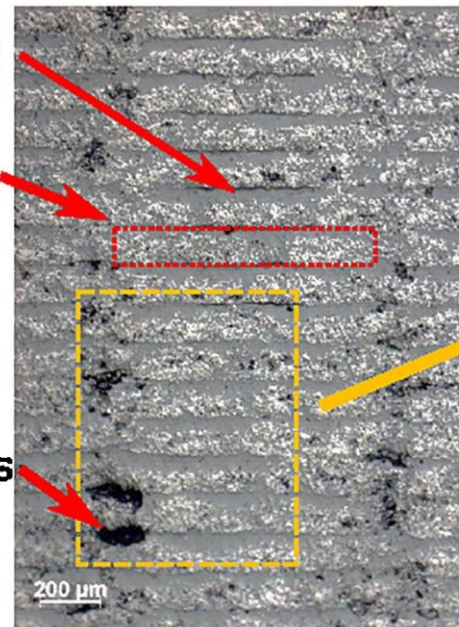
• چسبندگی ضعیف لایه‌ها



Inter-track voids

Printed track

Voids



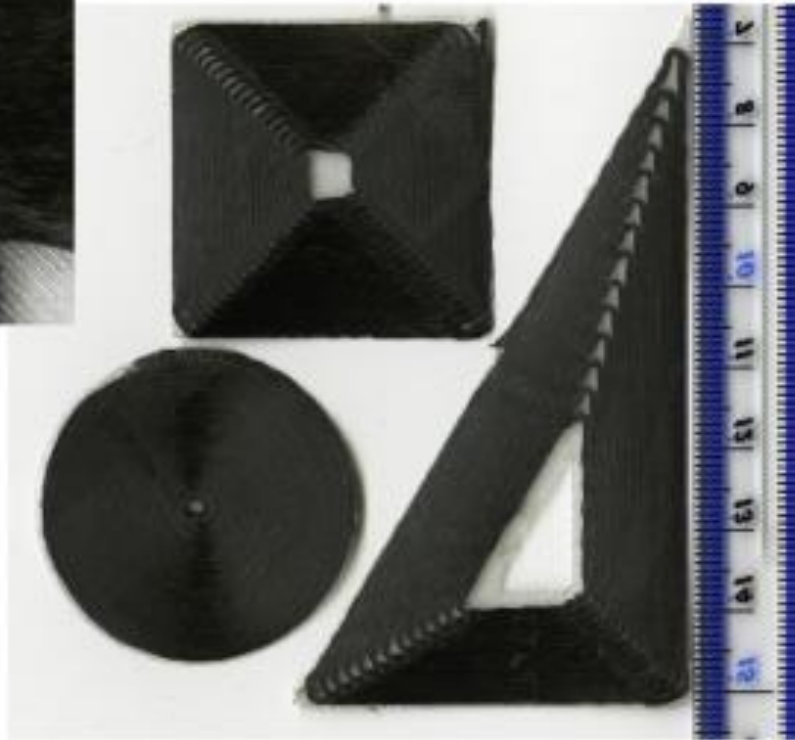
آغستگی نامناسب و وجود حفره در فیلامنت

عیوب مؤثر بر خواص مکانیکی

- حفره (ماده پایه و پرینت)

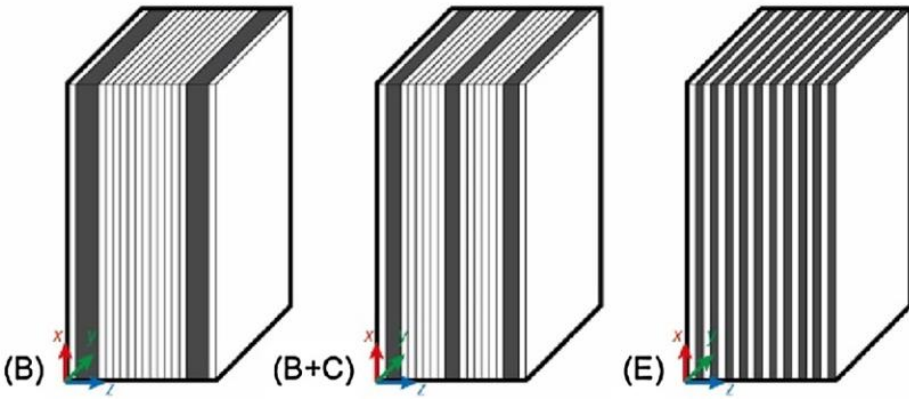
- عدم آغستگی مناسب الیاف

- چسبندگی ضعیف لایه‌ها



عدم پرشدگی در گوشه‌ها و شعاع‌های کوچک

پارامترهای مؤثر بر خواص مکانیکی



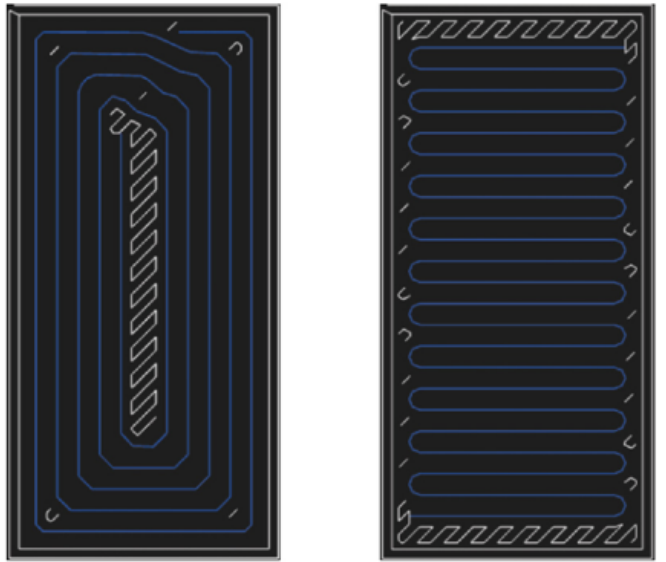
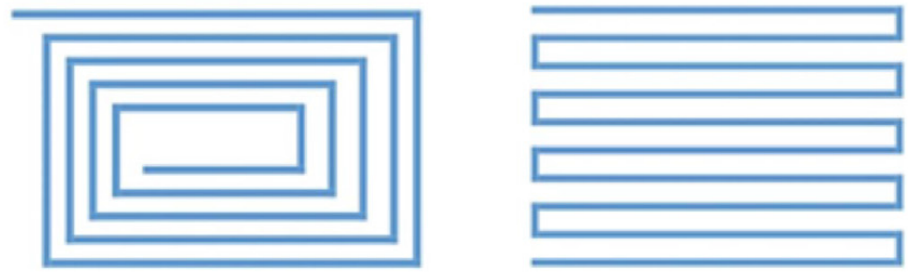
— PA6 matrix
100% infill
Rectangular pattern

— CF reinforcement

Isotropic

Concentric

0° -45° 90° +45°



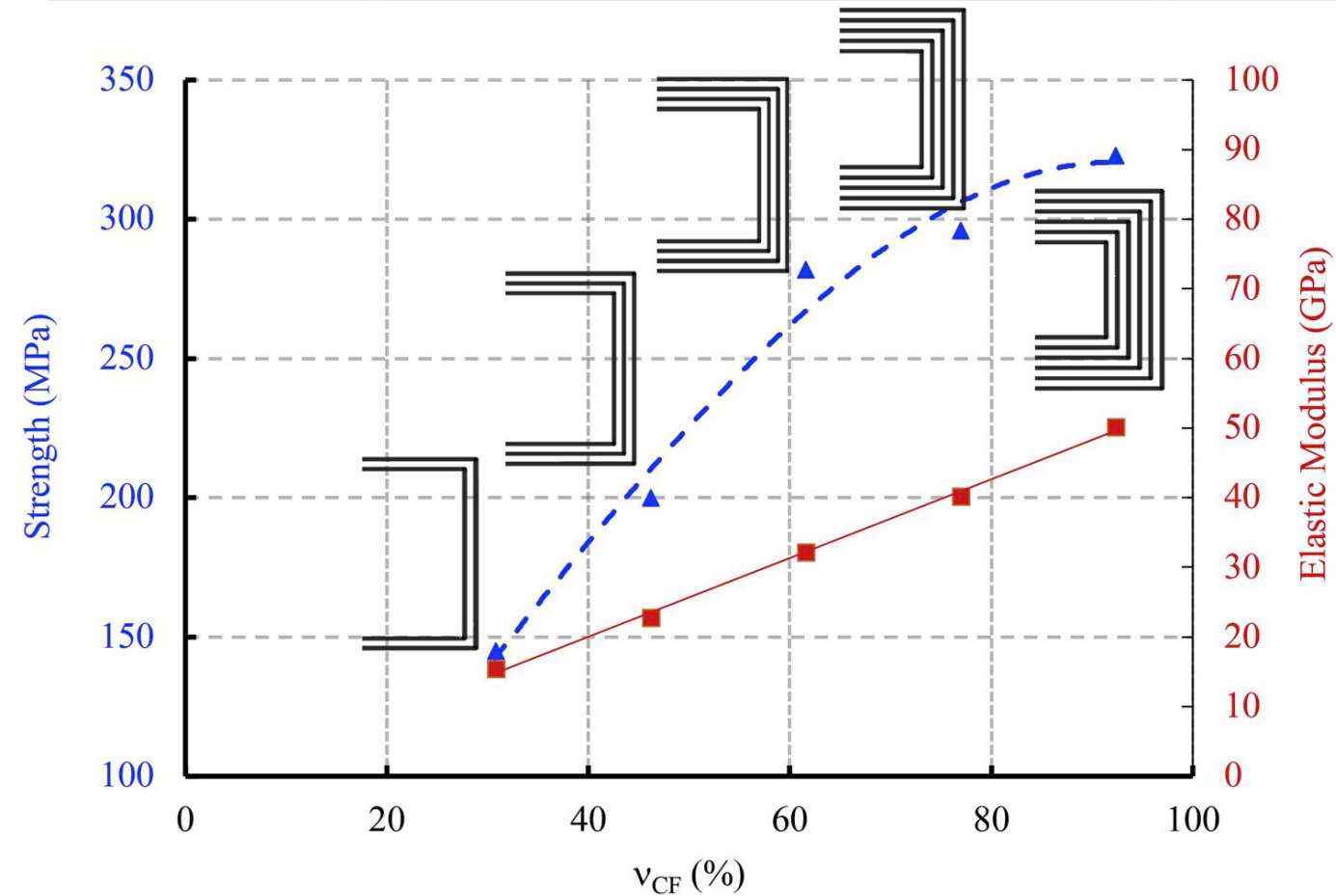
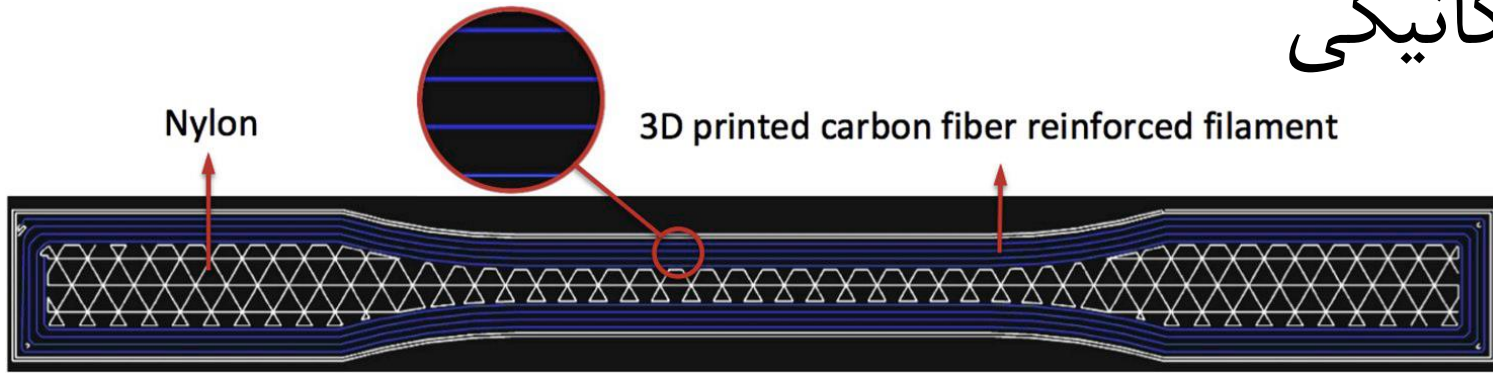
— Carbon fiber

— Polyamide 6

Specimen	Compressive Modulus (GPa)	St dev	Proportional Limit (MPa)	St dev
I_B	1.093	0.019	30.0	1.410
I_B + C	1.332	0.016	36.5	2.120
I_E	1.475	0.035	39.5	0.707
C_B	1.064	0.021	30.5	0.707
C_B + C	1.472	0.038	36.0	0.000
C_E	1.690	0.005	40.5	0.707

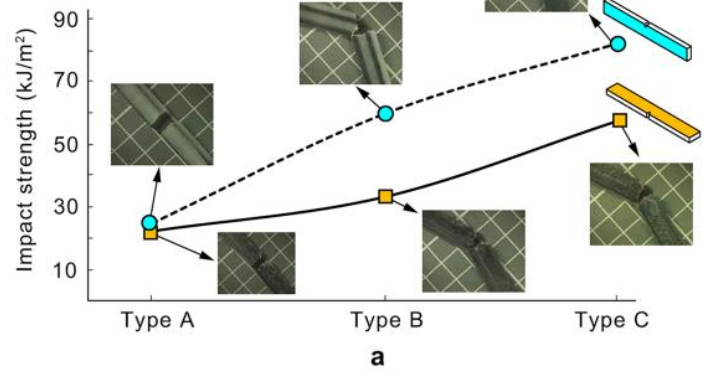
Specimen	Flexural Modulus (GPa)	St dev	Proportional Limit (MPa)	St dev
I_XY	3.39	0.14	38.89	1.32
I_XZ	1.45	0.04	26.91	2.57
C_XY	5.41	0.07	59.07	2.10
C_XZ	2.39	0.05	35.38	0.72

پارامترهای مؤثر بر خواص مکانیکی

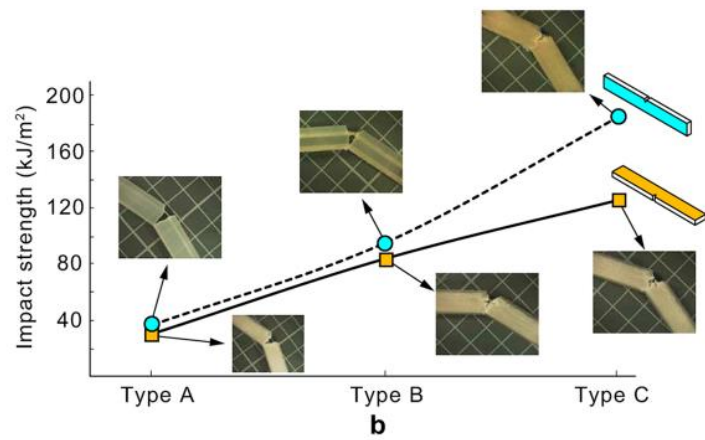


پارامترهای مؤثر بر خواص مکانیکی

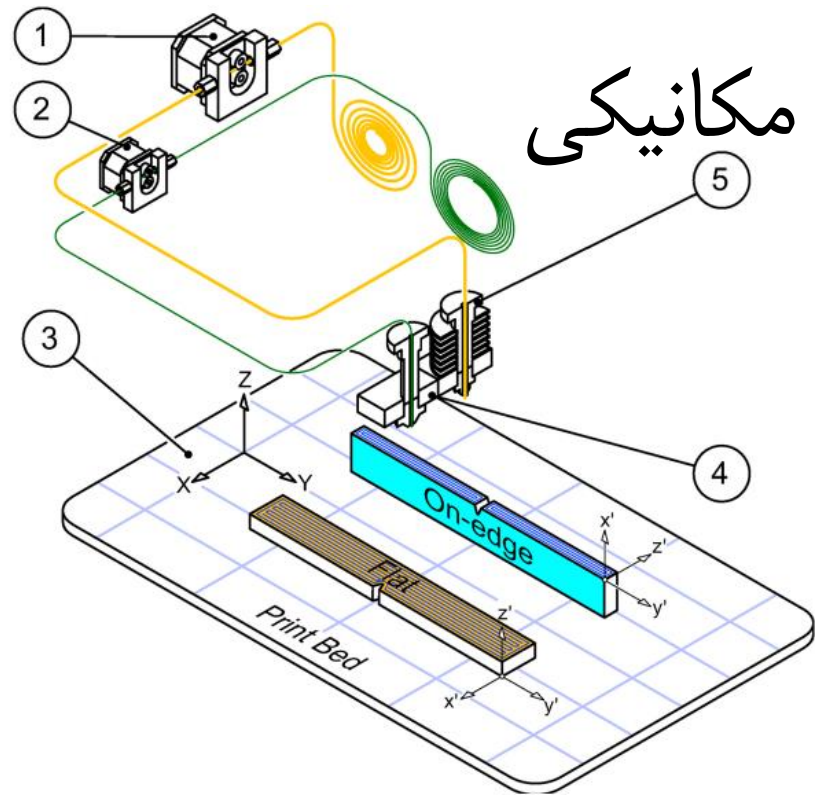
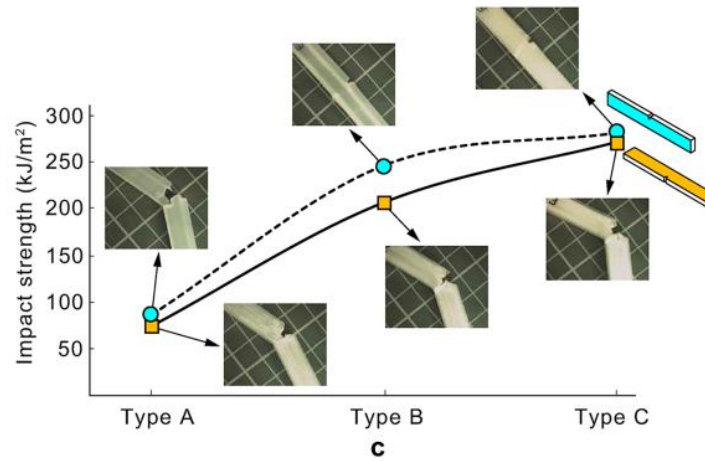
Carbon fibre



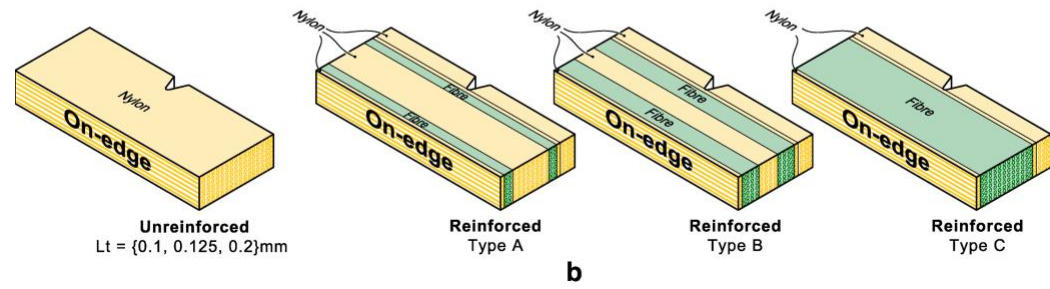
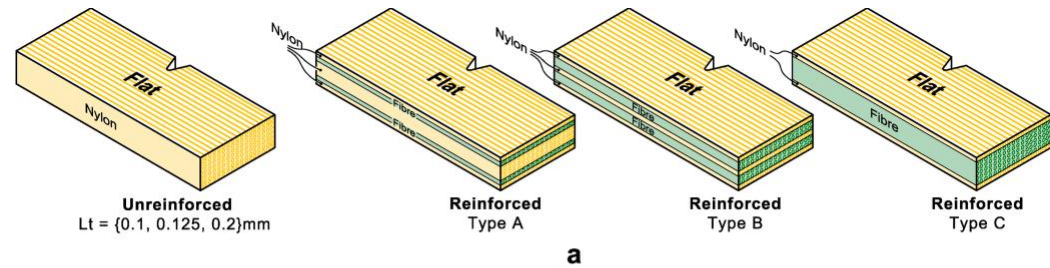
Kevlar®



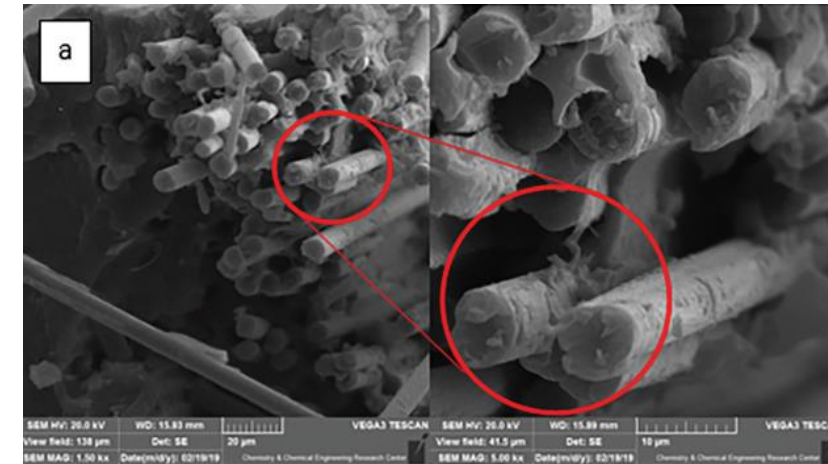
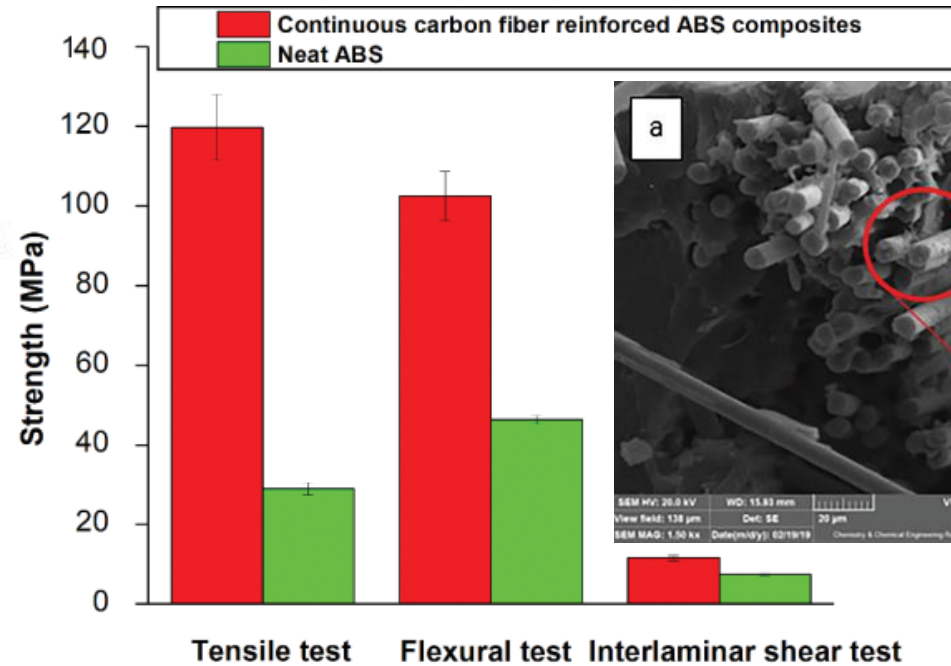
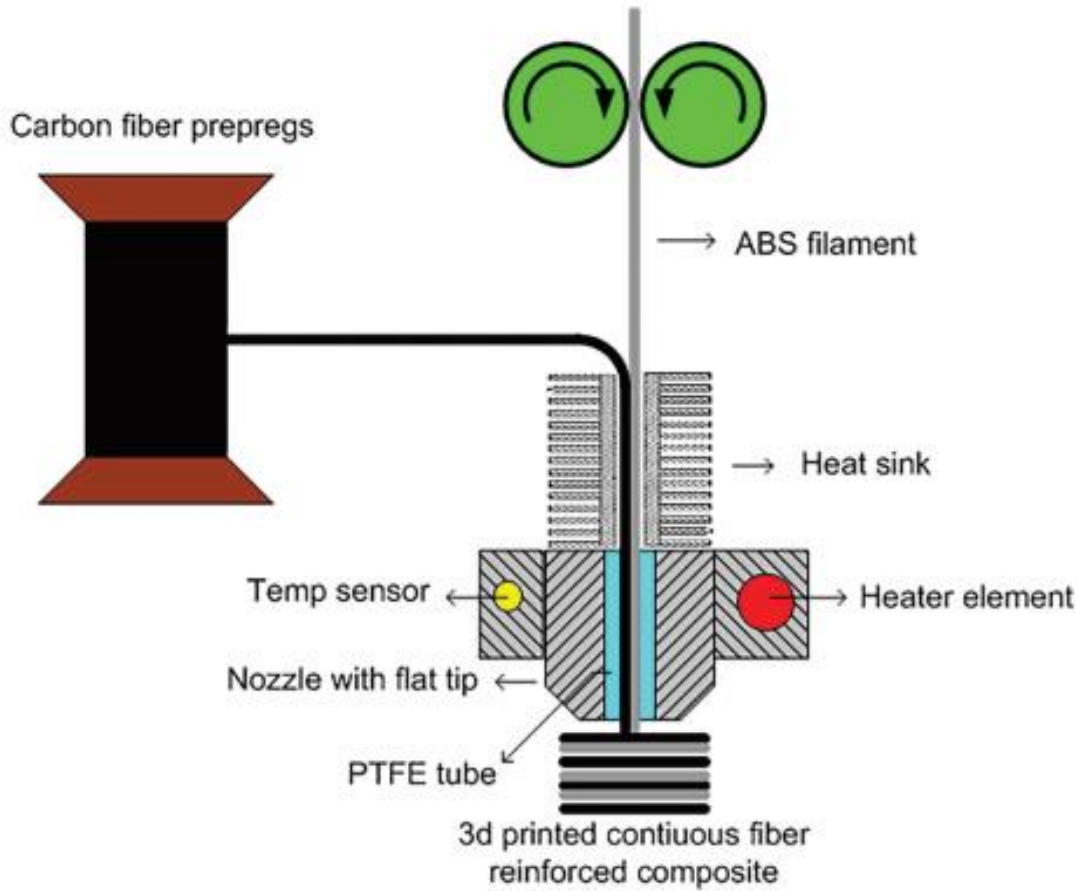
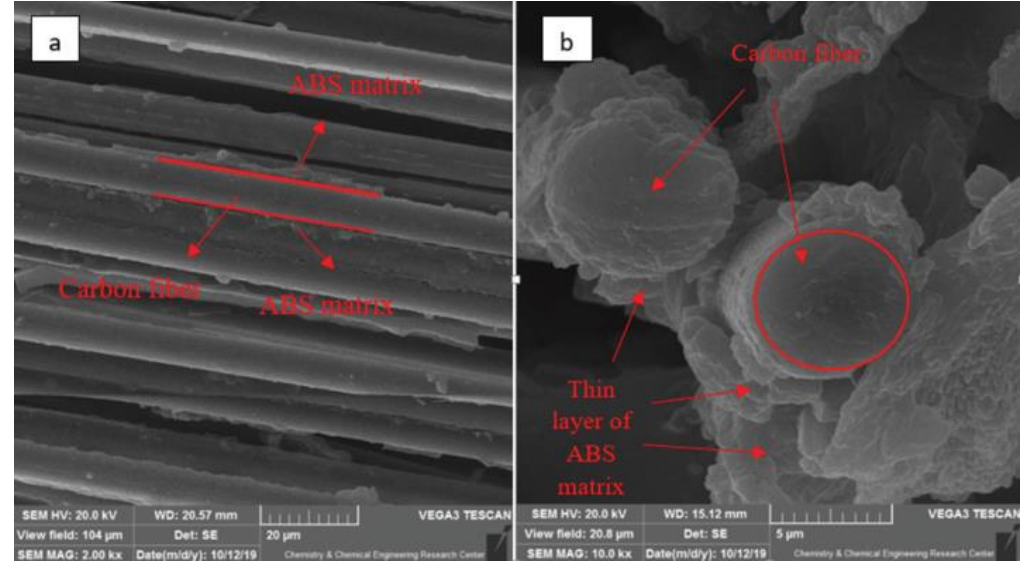
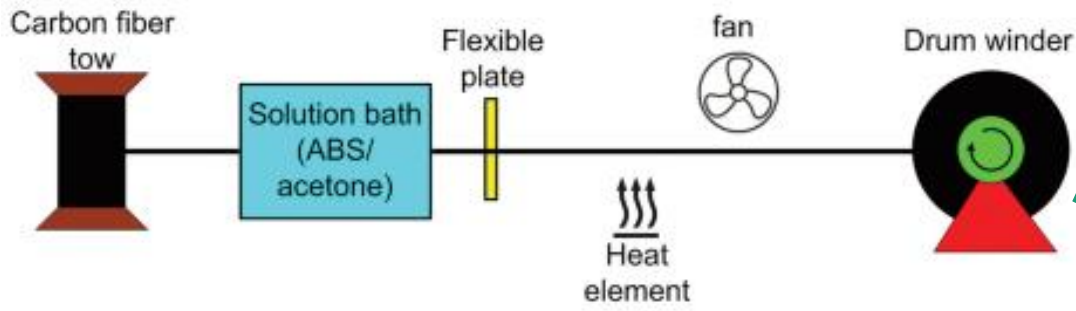
Glass fibre



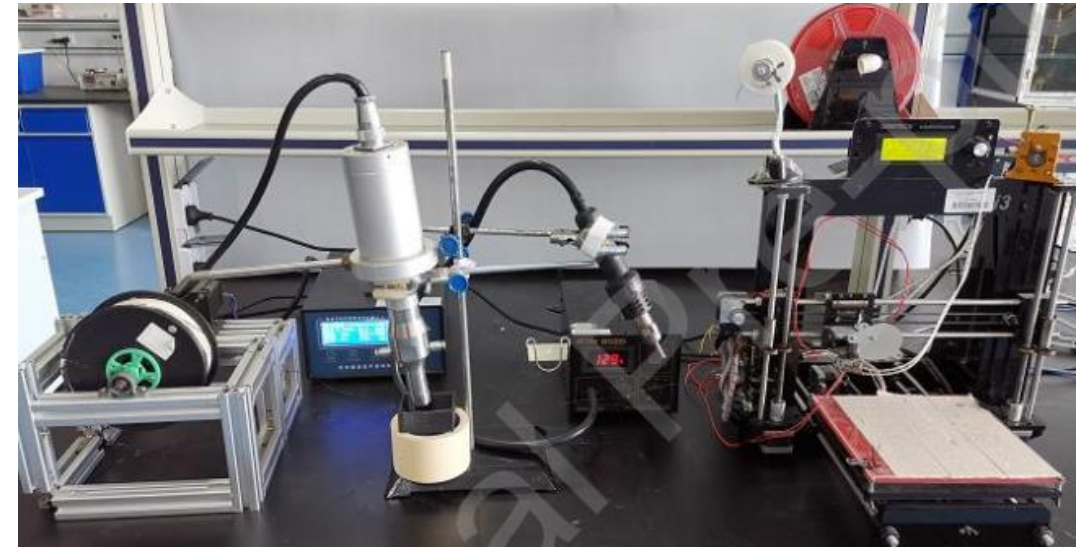
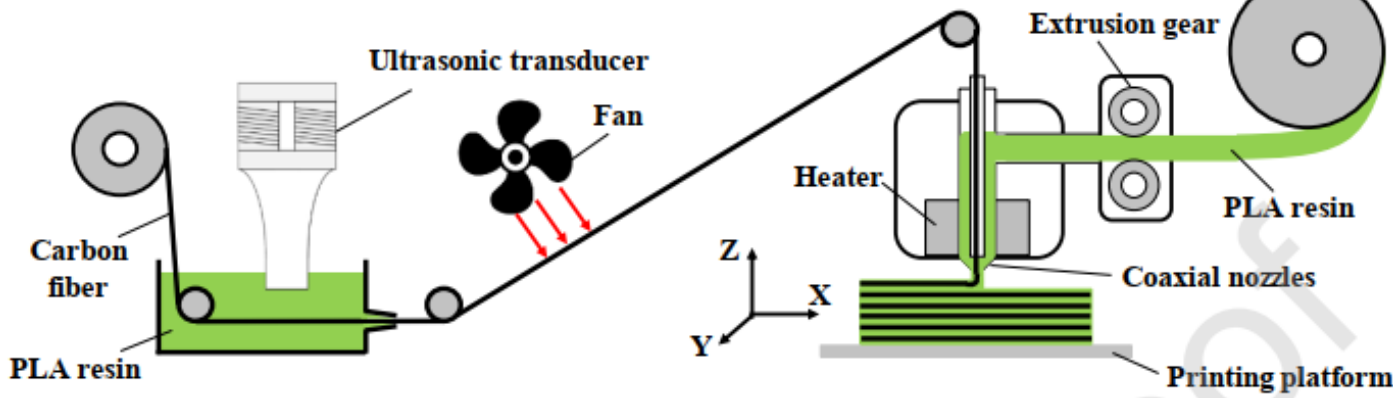
Parameter	Value			
Layer thickness of unreinforced samples (mm)	$L_t = \{0.1, 0.125, 0.2\}$			
Layer thickness of fibre reinforced samples (mm)	$L_t^{CARBON} = 0.125, L_t^{GLASS} = L_t^{KEVLAR} = 0.1$			
Fibre volume fraction (%)	Fibre volume type			
	Build Orientation	Type A	Type B	Type C
	Carbon fibre			
	Flat	3.44	24.94	53.18
	on-edge	3.38	24.82	33.16
	Kevlar® fibre			
	Flat	8.60	29.50	56.06
	on-edge	7.82	29.53	34.65
	Glass fibre			
	Flat	8.40	29.15	55.60
on-edge	7.82	29.68	34.30	



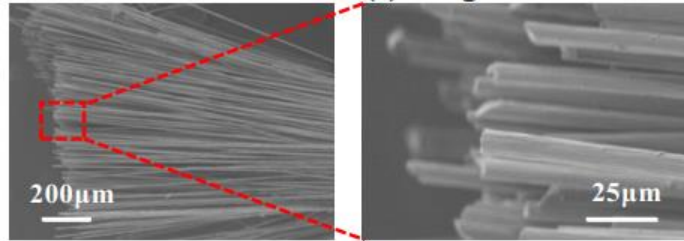
بهبود خواص مکانیکی: پیش آغشته سازی



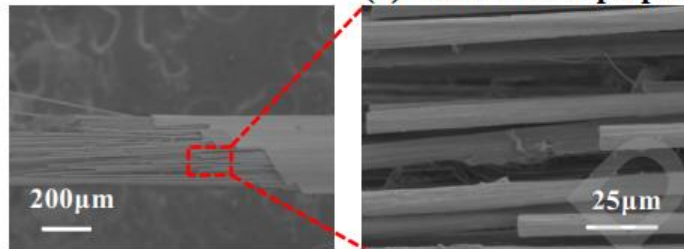
بهبود خواص مکانیکی: آغشته‌سازی آلتراسونیک



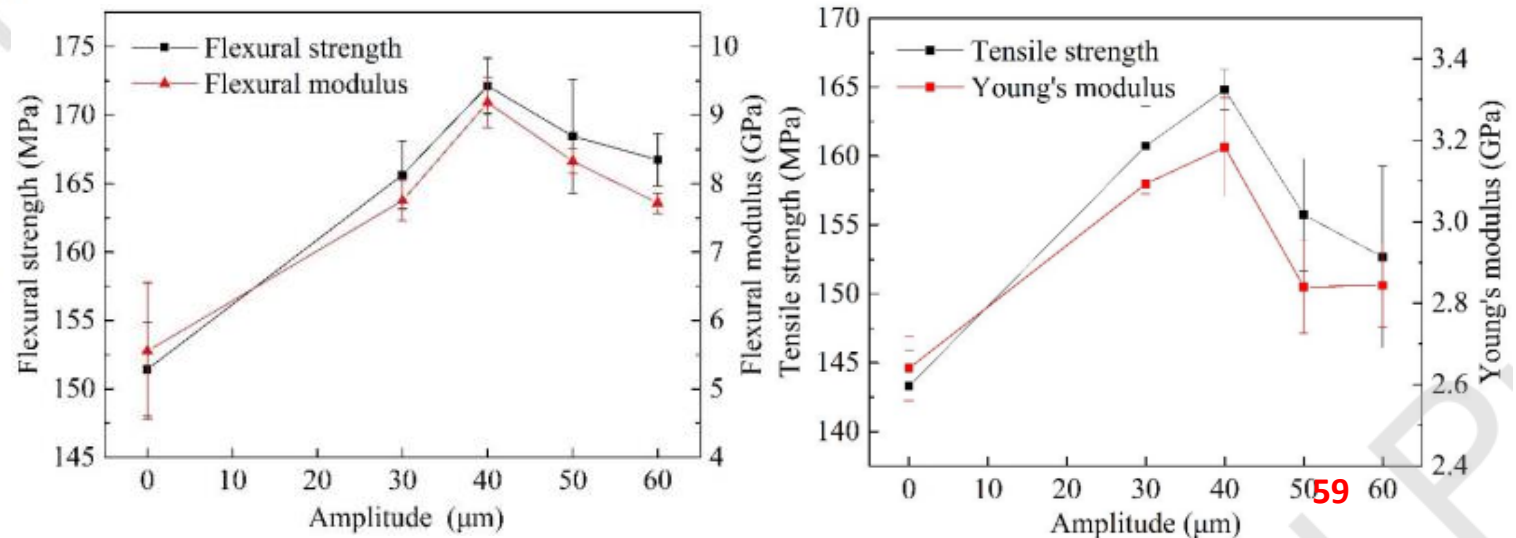
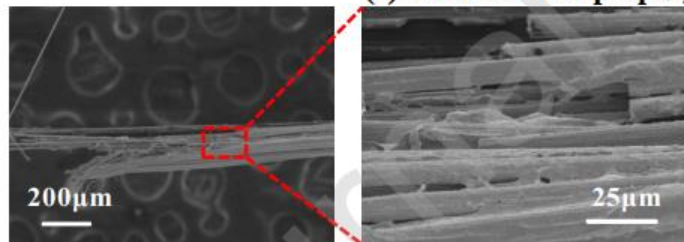
(a) Original carbon fiber bundles



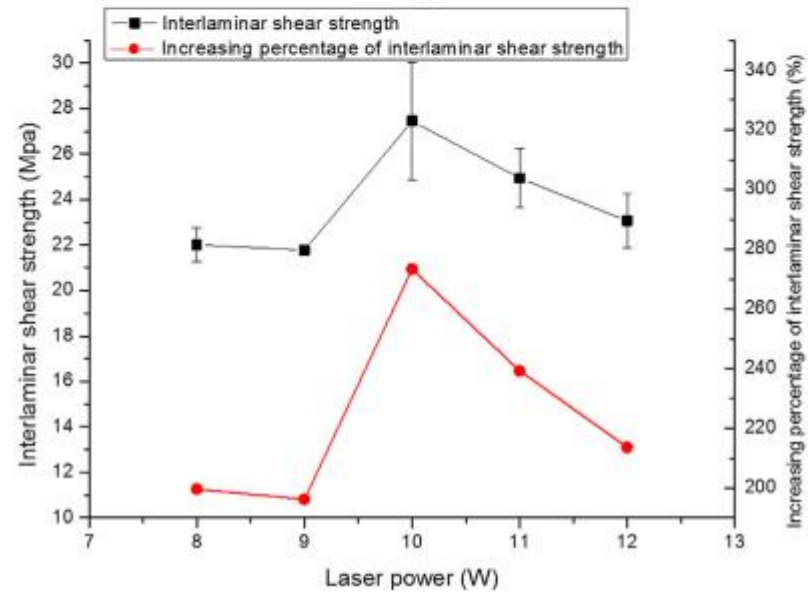
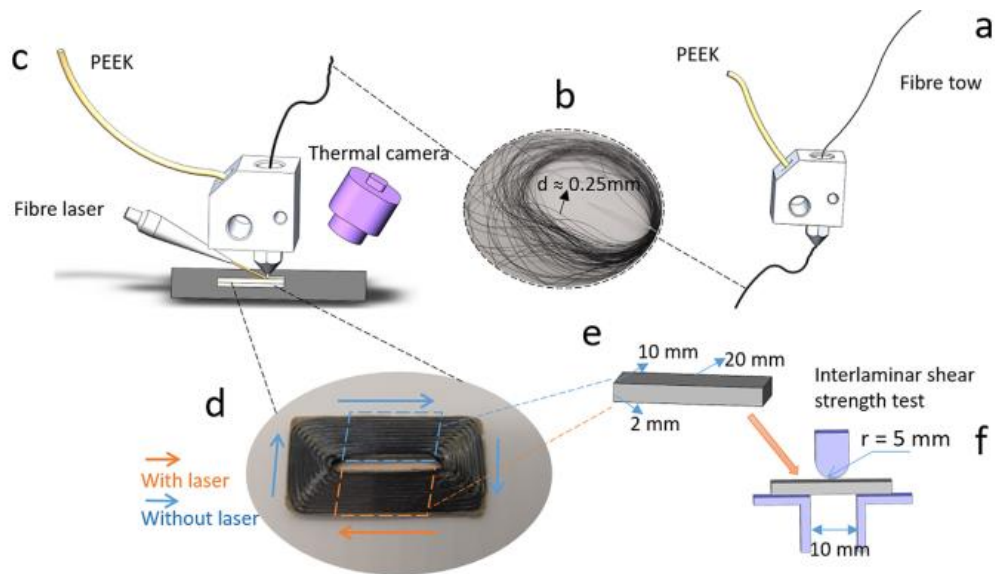
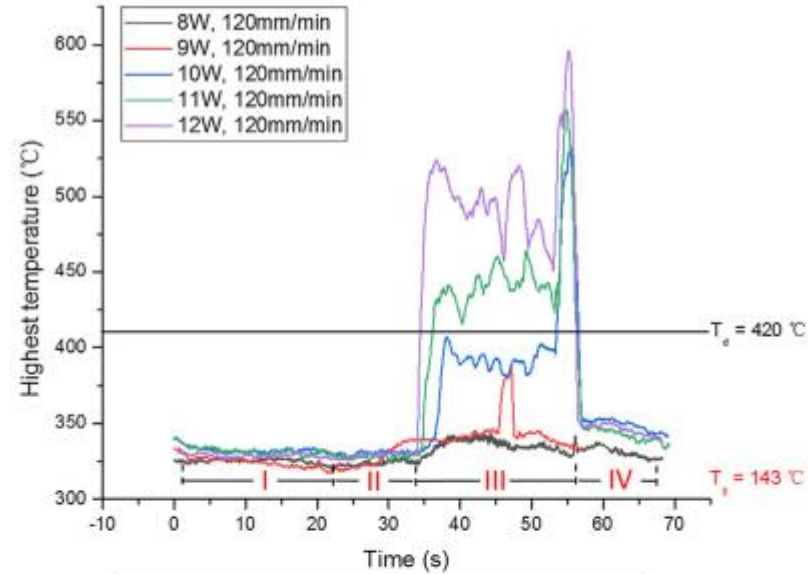
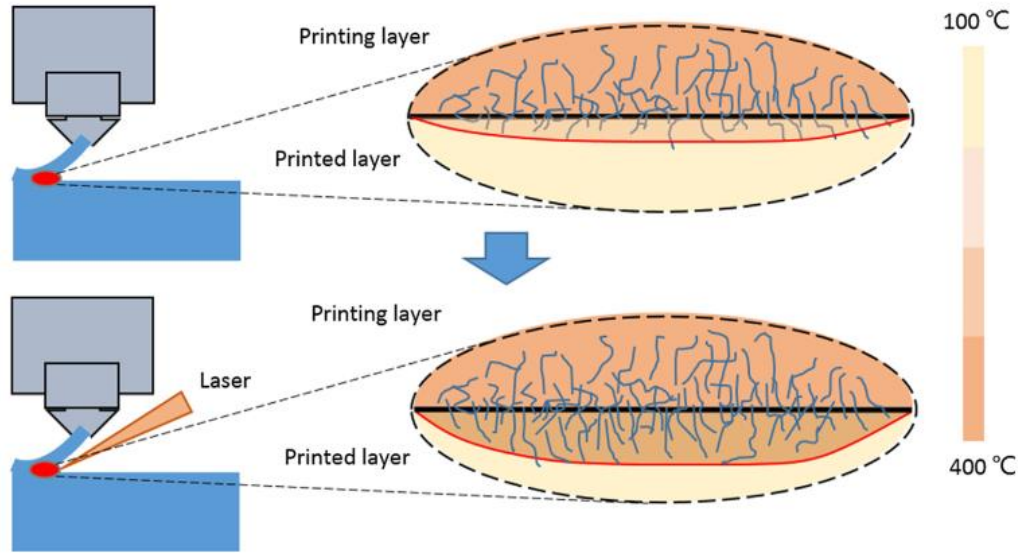
(b) Carbon fiber prepreg prepared without UT



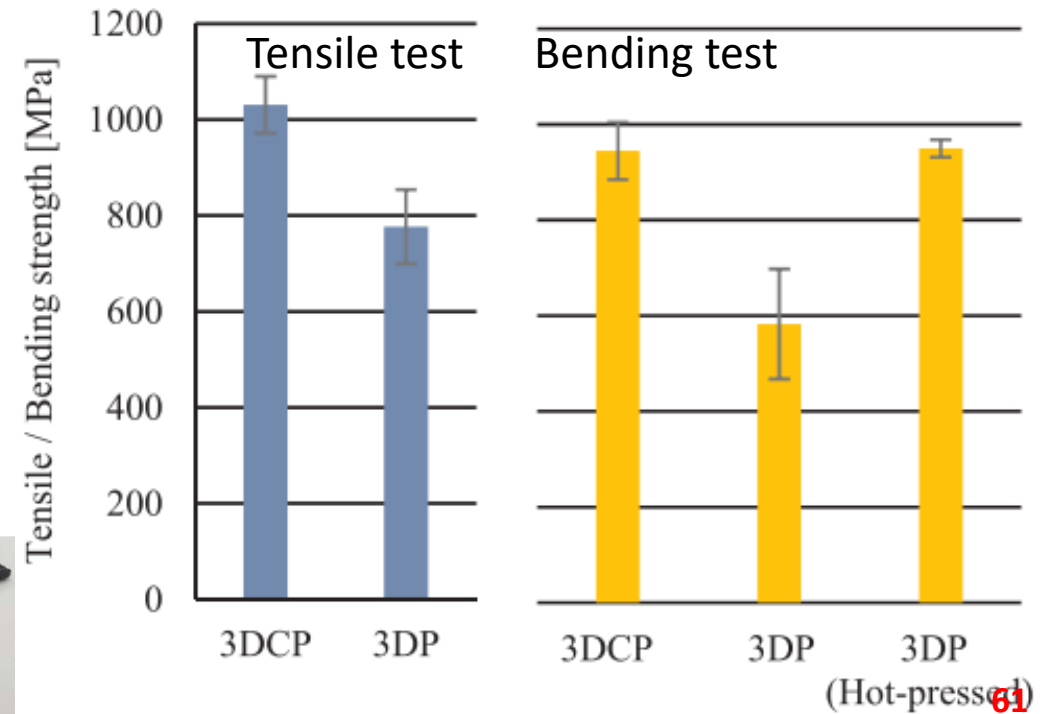
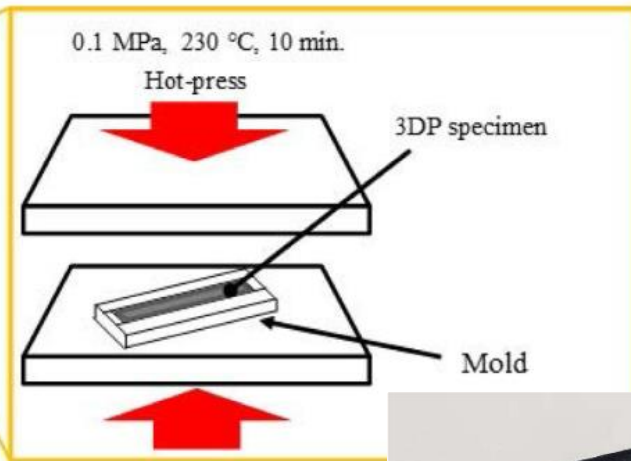
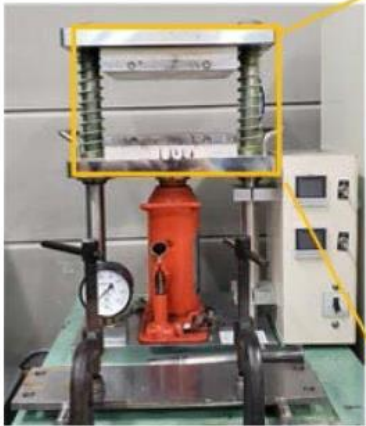
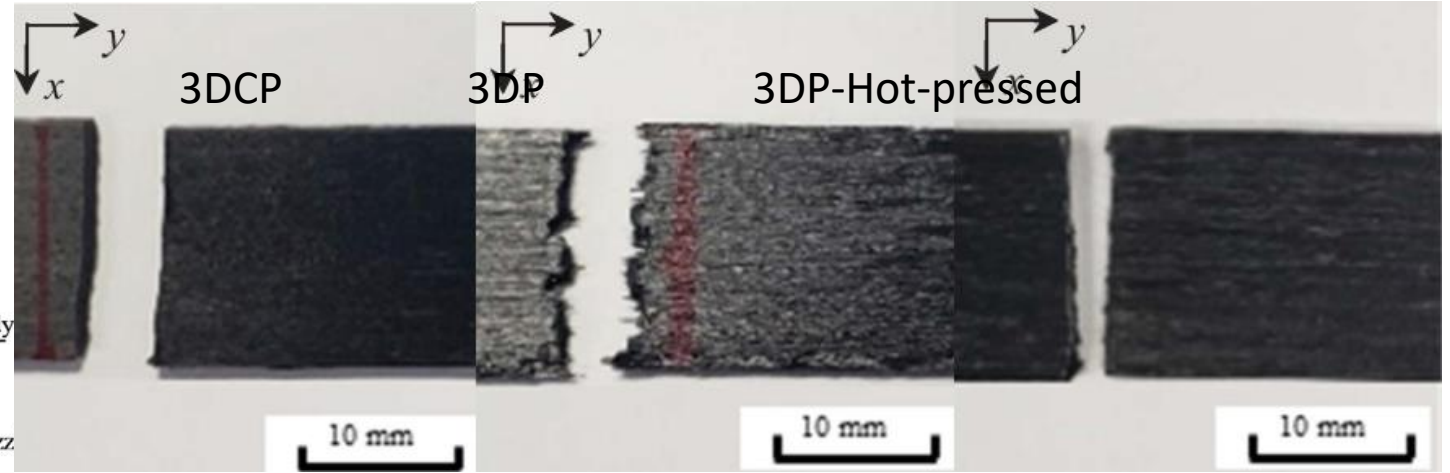
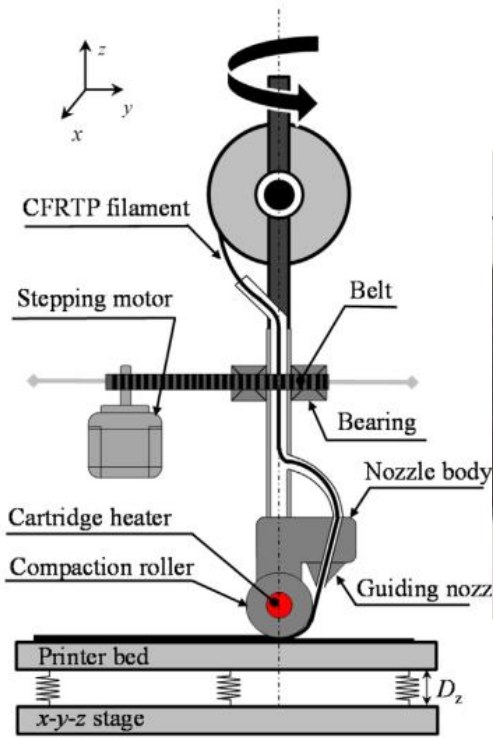
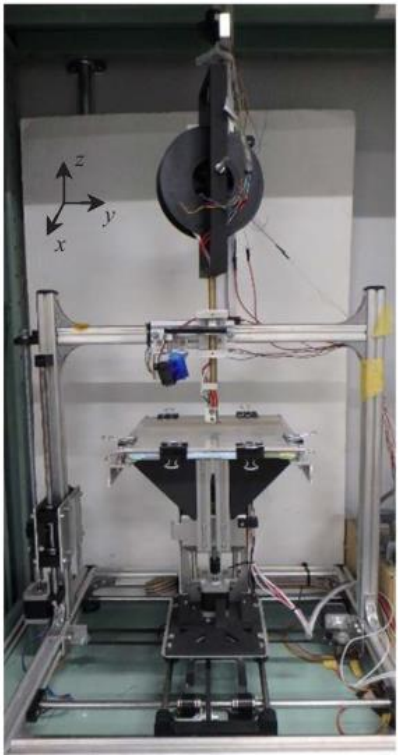
(c) Carbon fiber prepreg prepared with UT



بهبود خواص مکانیکی: گرم کردن لایه پرینت شده



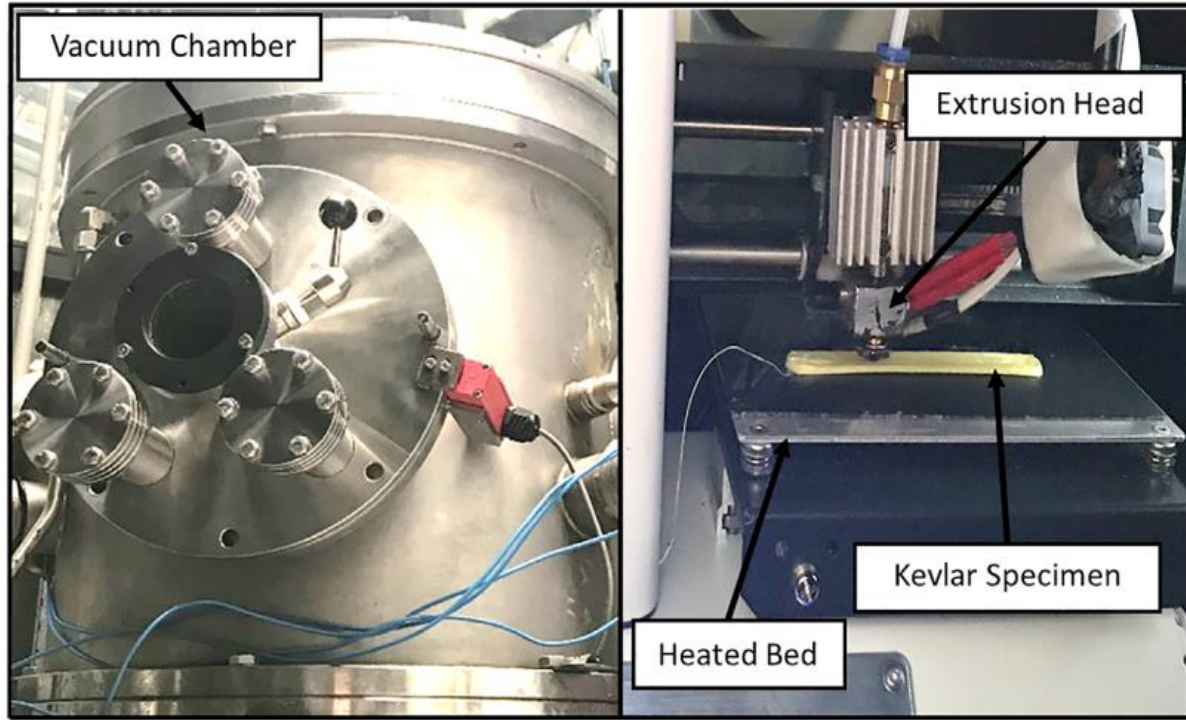
بهبود خواص مکانیکی: پرس گرم



بهبود خواص مکانیکی: وکیوم کردن

درصد تخلخل در قطعات پرینت شده در شرایط فشار مختلف

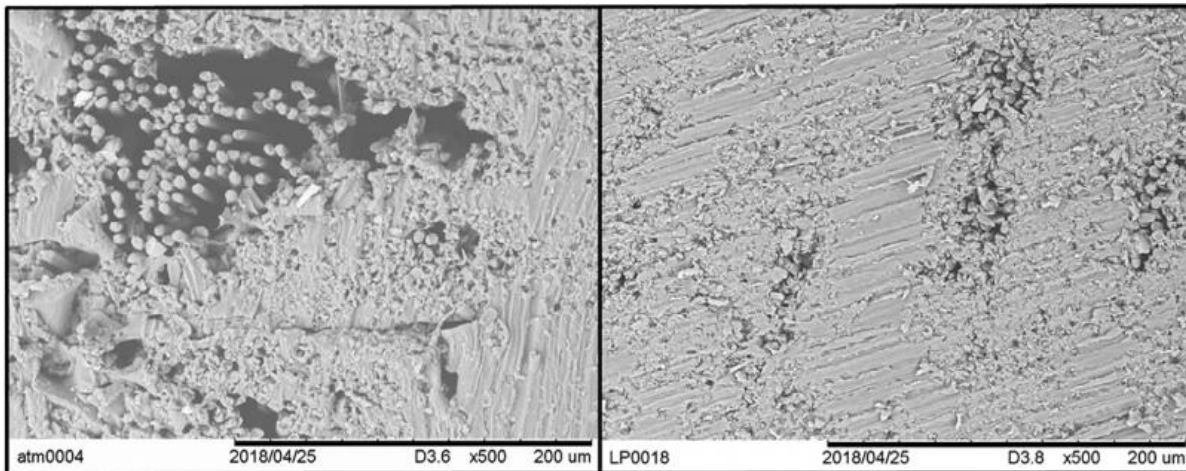
Fiber	Printing condition	Porosity (%)	P-value
Carbon	Atmospheric	6.8 ± 1.6	<.000
	Low pressure	1.1 ± 0.5	
Glass	Atmospheric	1.5 ± 0.2	<.000
	Low pressure	0.5 ± 0.2	
Kevlar	Atmospheric	2.5 ± 0.9	<.005
	Low pressure	0.8 ± 0.2	



محفظه خلاء که دستگاه پرینتر در داخل آن قرار دارد

استحکام برشی بین لایه‌ای (interlaminar shear strength)

Fiber	Printing condition	Force (N)	ILSS (MPa)	P value
Carbon	Atmospheric	575 ± 122	43 ± 7.4	<.000
	Low pressure	759 ± 72	58 ± 5.2	
Glass	Atmospheric	522 ± 41	39 ± 3.4	<.001
	Low pressure	643 ± 78	48 ± 5.6	
Kevlar	Atmospheric	390 ± 18	28 ± 2.0	<.001
	Low pressure	423 ± 20	32 ± 1.3	



مقایسه مقطع قطعات پرینت شده در خلغ و فشار اتاق