آزمایشگاه تحقیقاتی
ساخت افزایشی
دانشگاه سمنان

مباحث منتخب (ساخت افزایشی)

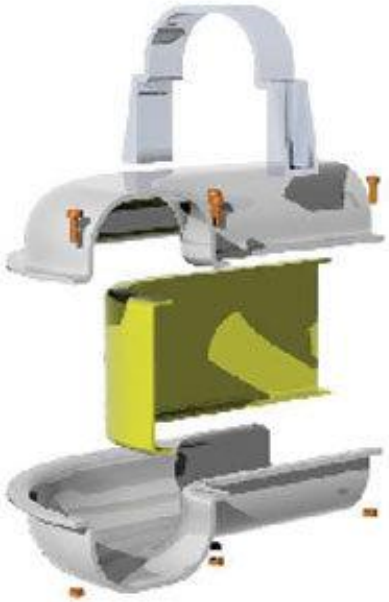
طراحی برای ساخت افزایشی (Design for AM)

استاد درس:

دکتر عبدالواحد کمی

قابلیت‌های AM در طراحی

- ✓پیچیدگی شکلی
- ✓ پیچیدگی سلسله مراتبی
- ✓ پیچیدگی کاربردی
- ✓ پیچیدگی مواد
- ✓ پیچیدگی هندسه
- ✓ بازطراحی
- ✓ طراحی ویژه تجاری



Duct: conventional
Assembled, vacuum form
Part Count = 16 plus glue

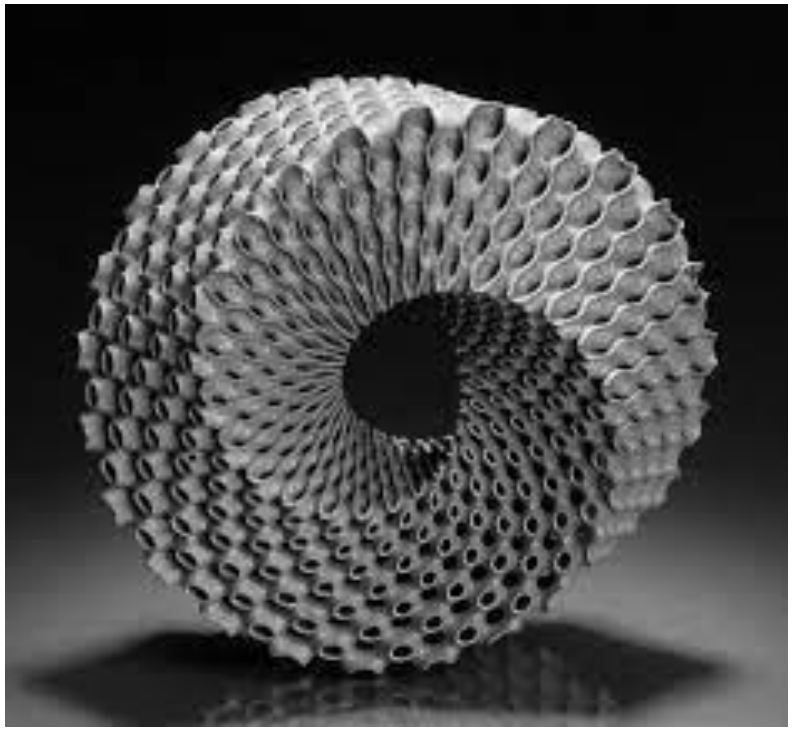
Duct: consolidated for additive
Fabrication with SLS
Part Count = 1

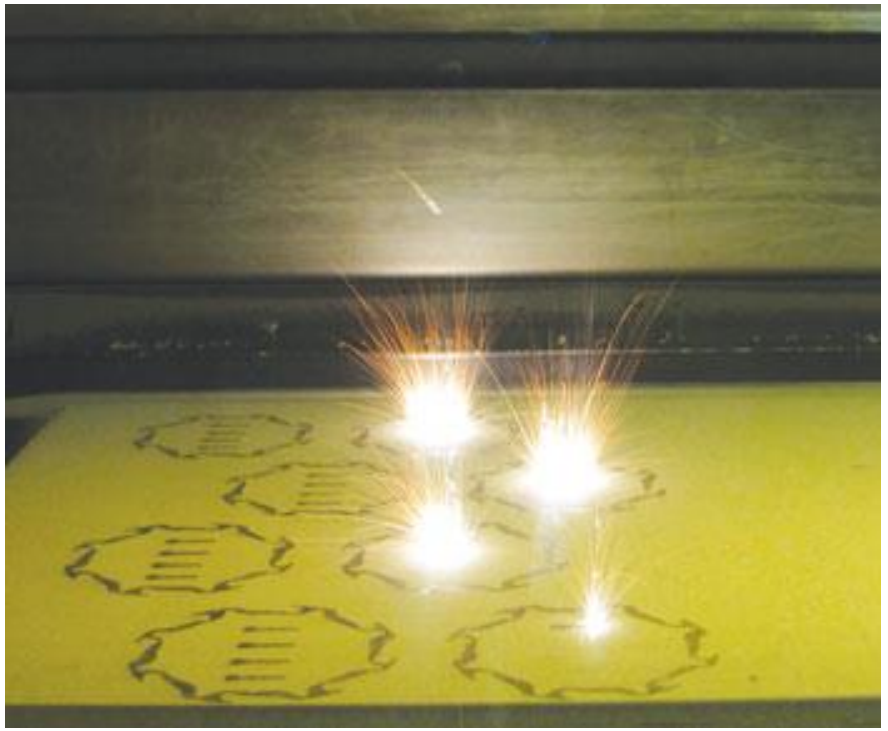
Value Drivers

- Easier to design
- Less supply chain
- No tooling
- Less Labor
- No assembly error
- Less certification
- Lighter Product
- Better!

قابلیت‌های AM در طراحی: پیچیدگی شکلی

- پیچیدگی شکلی هر لایه تأثیری در ساخت لایه ندارد.
- مقایسه با فرایندهای سنتی مانند ماشینکاری و تزریق پلاستیک





قابلیت‌های AM در طراحی: پیچیدگی سلسله مراتبی

- در مقیاس میکرو (**ریزساختار**): توانایی ایجاد رفتار (مکانیکی، سایشی، خوردگی و ...) متفاوت در بخش‌های مختلف قطعه

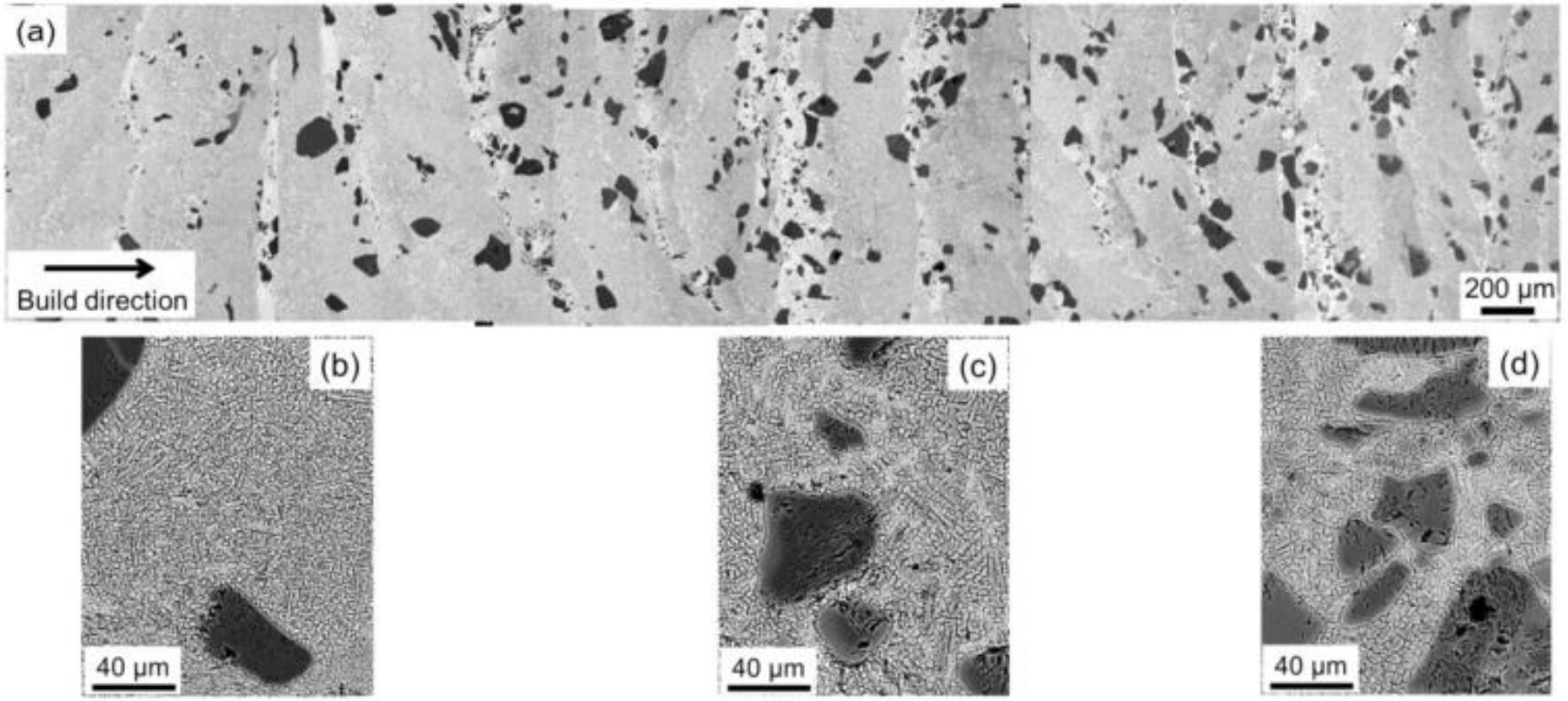
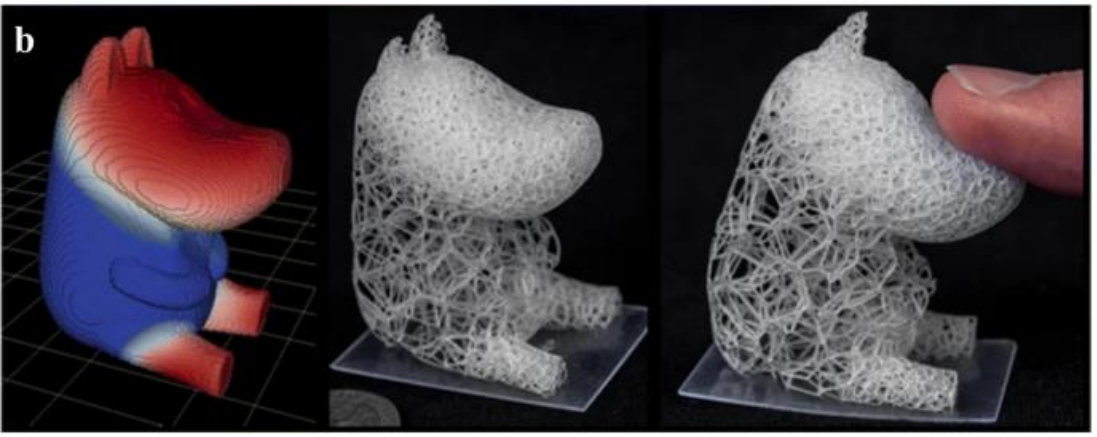


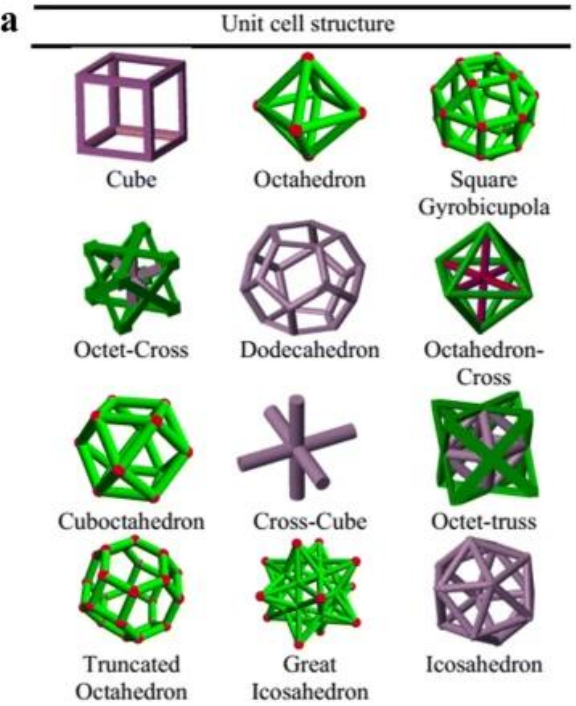
Fig. 9. (a) Stack of back-scattered electron images covering the entire cross-section of the gradient Ti/TiC composite. (b-d) Magnified images highlighting the changes in the fractions of undissolved TiC particles, taken from locations where the expected TiC content is 20%, 40% and 60%.

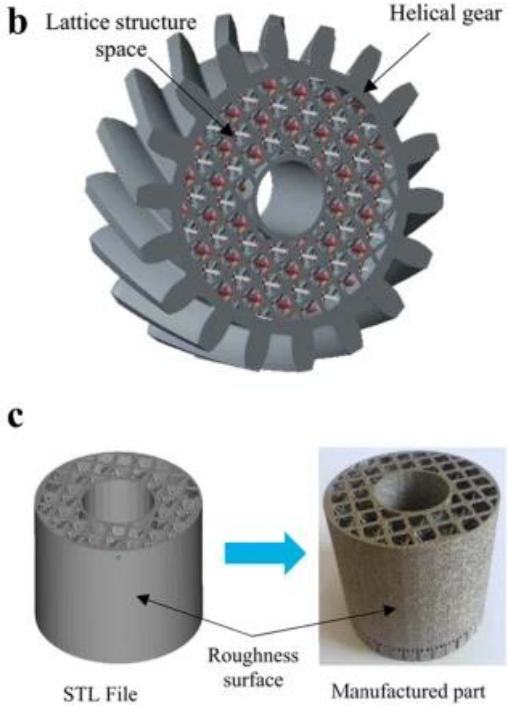
قابلیت‌های AM در طراحی: پیچیدگی

سلسله مراتبی

- در مقیاس ماکرو: جذب انرژی، خواص حرارتی، عایق صوتی، افزایش نسبت استحکام به وزن و ...



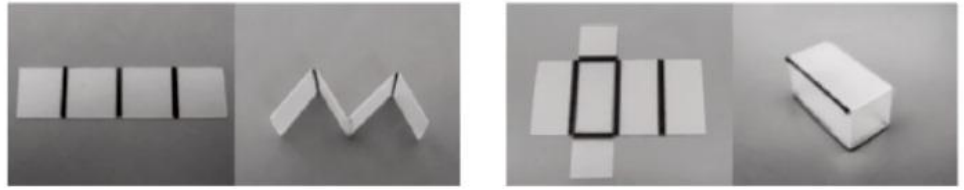




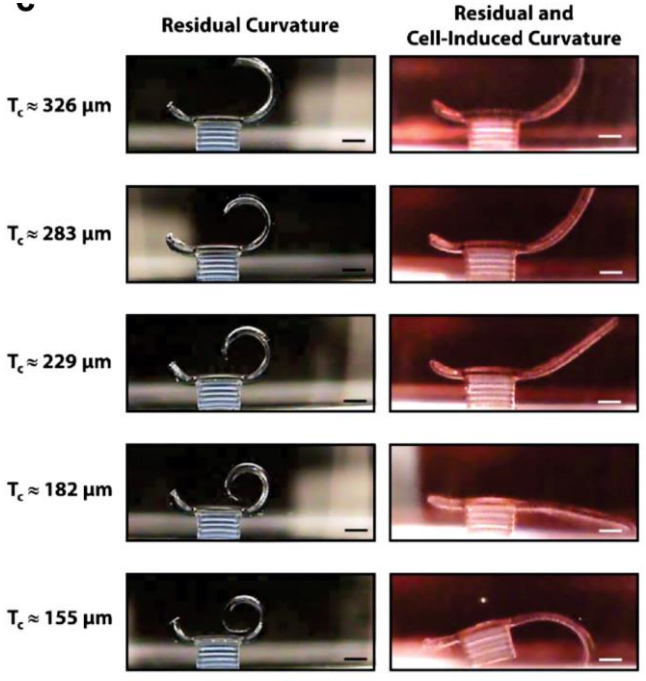
قابلیت‌های AM در طراحی:

پیچیدگی کاربردی

- امکان تولید محصولات متحرک، مدارها، سنسورها و ... روی قطعات

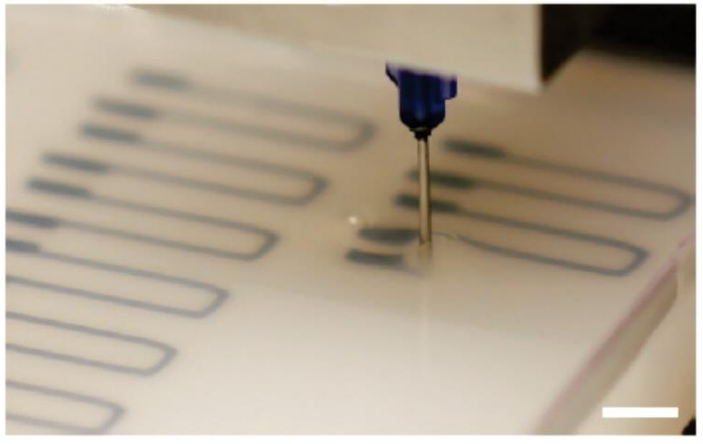


Pre-strained polystyrene substrate with inkjet-printed hinges made of carbon black ink.

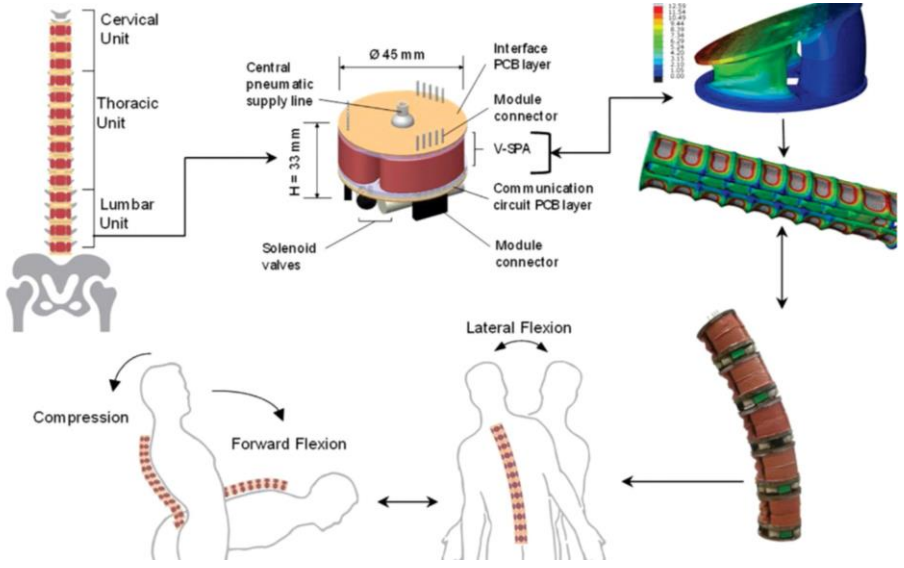


3D stereolithography-printed bat with curvature time lapse

Embedded 3D printing of soft strain sensor for soft robots



Pneumatic actuator for spinal compression and flextion with 3D-printed mould



4D-printed unfolded box composed of shape memory polymers

قابلیت‌های AM در طراحی: پیچیدگی موادی

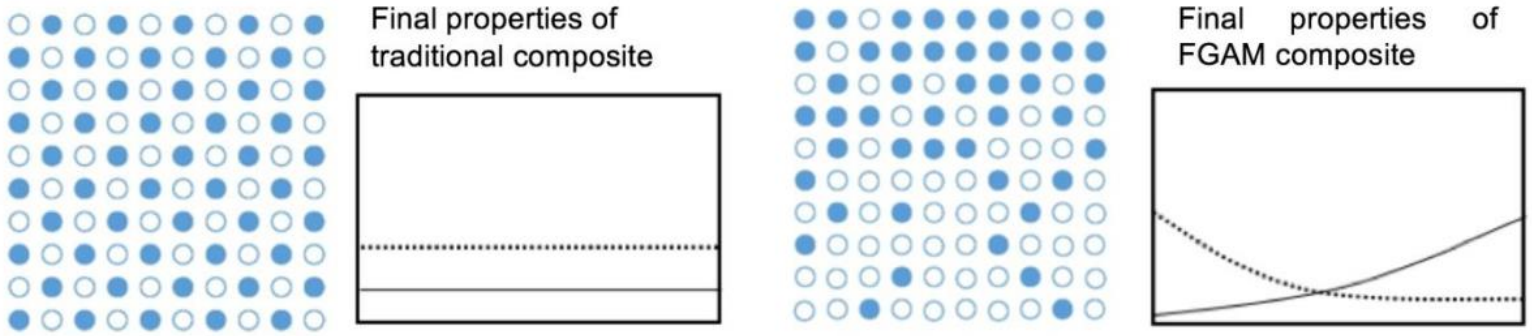
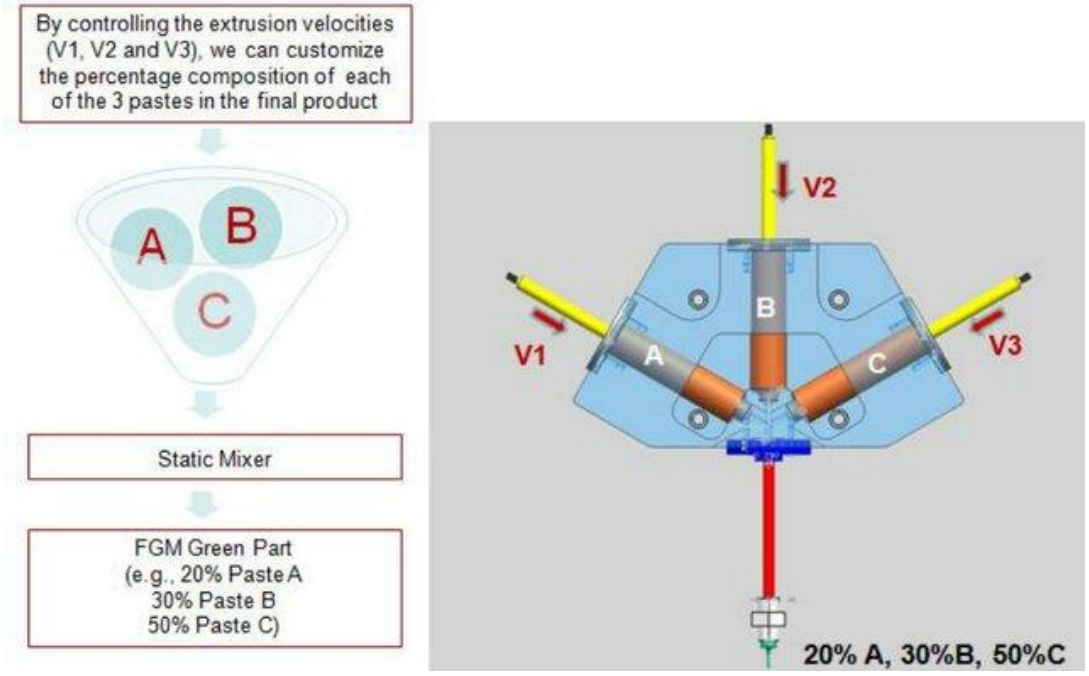


Figure 4: Traditional composite versus FGAM composite and schematic structures to illustrate the change in material properties in thermal conductivity (….) and elastic modulus (–) (Craveiro, et al, 2013).

- امکان تولید قطعات چند ماده‌ای، گرادیانی



Freeze-form Extrusion Fabrication (FEF)

FEF builds a '**green**' (before postprocessing) part in an environment **below the freezing point of water** to **solidify the paste** after the deposition of each layer during the fabrication process.

قابلیت‌های AM در طراحی: پیچیدگی موادی

Selective Laser Sintering (SLS)

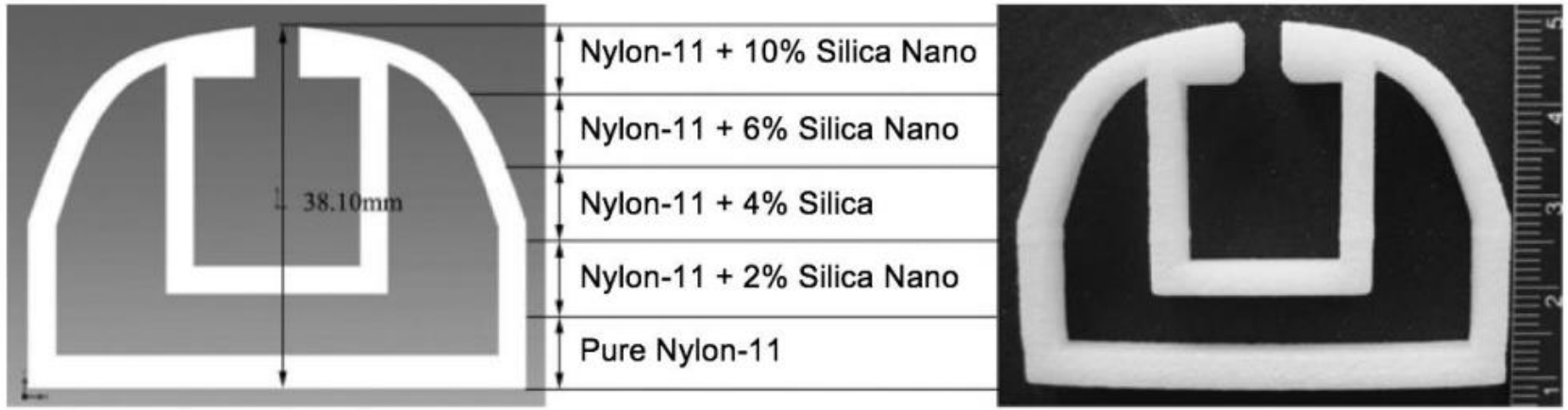
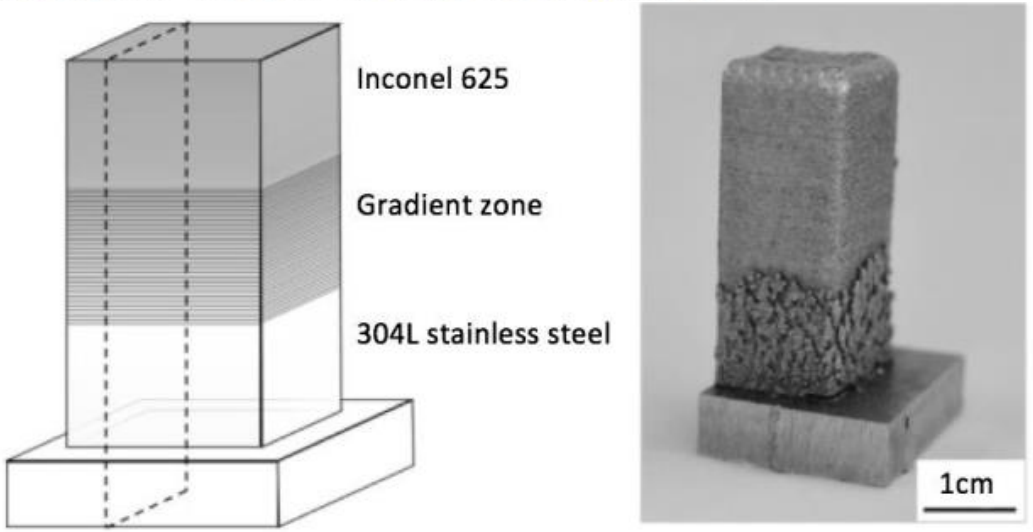


Figure 17: Compliant gripper. 7.62mm each layer [Mumtaz, 2007].

- امکان تولید قطعات چند ماده‌ای، گرادیانی



Laser metal deposition (LMD)

Figure 20: Schematic and photograph of gradient alloy specimen by Carrol [Caroll, 2016]. The dotted line shows where the part was sectioned for analysis.

قابلیت‌های AM در طراحی:

پیچیدگی موادی

Table 2: Supporting additive manufacturing technologies for FGM and its classifications with referenced to ISO/ ASTM [38].

AM Process	Power source	Description	Supporting Techniques for FGAM	Material
Material extrusion	Thermal Energy	Material selectively is dispensed through a nozzle or extruder.	Fused deposition modelling (FDM) Freeze-form Extrusion Fabrication (FEF)	Thermoplastics, ceramic slurries, metal pastes
Powder bed fusion	High-powdered laser beam Electron beam	Feedstock is deposited and selectively fused by means of a heat source or bonded by means of an adhesive to build up parts.	Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Selective Laser Melting (SLM), Selective Mask Sintering (SMS), Electron Beam Melting (EBM)	Polyamides or polymer, atomized metal powder, ceramic powder.
Directed energy deposition	Laser beam	Thermal energy is used to fuse materials by melting as they are being deposited.	Laser Engineering Net Shape (LENS), Directed Metal Deposition (DMD)	Molten metal powder
Sheet lamination	Laser Beam	Sheets of material are bonded together and selectively cut in each layer to create a desired 3D object.	Laminated Object Material (LOM), Ultrasonic Consolidation (UC)	Plastic film, metallic sheet, ceramic tape
Material jetting	Photo curing	Droplets of build material are selectively deposited layer by layer.	PolyJet Technology (PJT)	Photopolymer digital materials

ACCEPTED MANUSCRIPT

قابلیت‌های AM در طراحی: پیچیدگی هندسی

- در برخی از کاربردها مانند تولید بافت پارچه پرینت شده، تعداد سطوح افزایش یافته و نمایش گرافیکی آنها مشکل می‌شود.
- اشغال حجم زیاد و نیاز به حافظه بالا

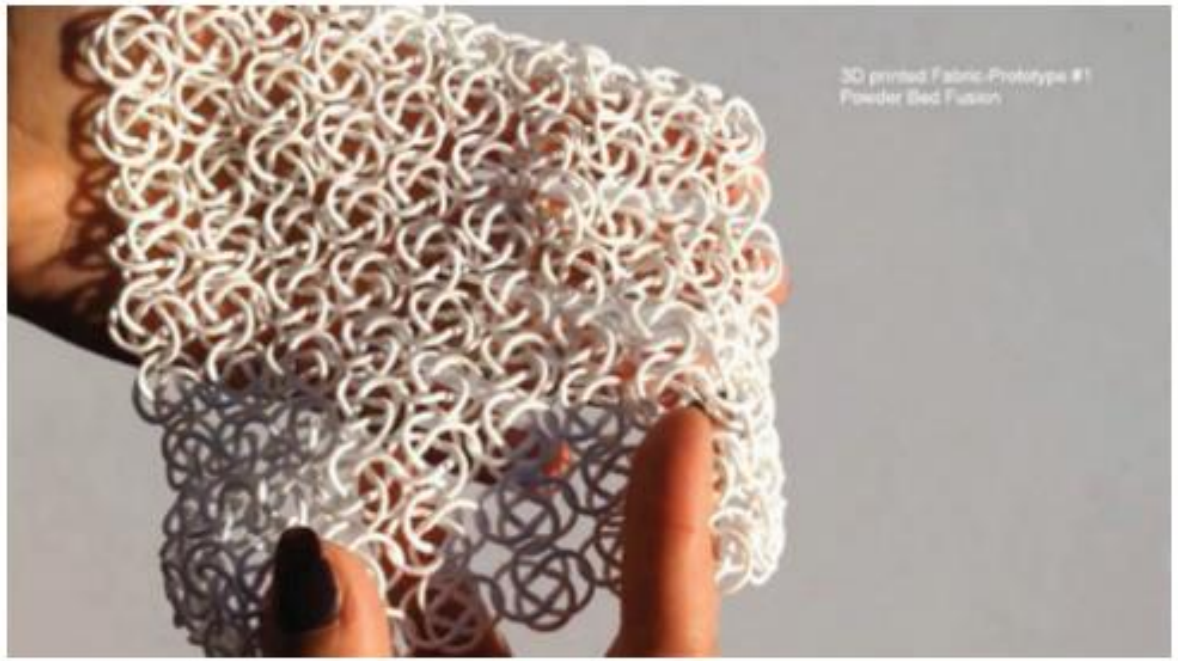
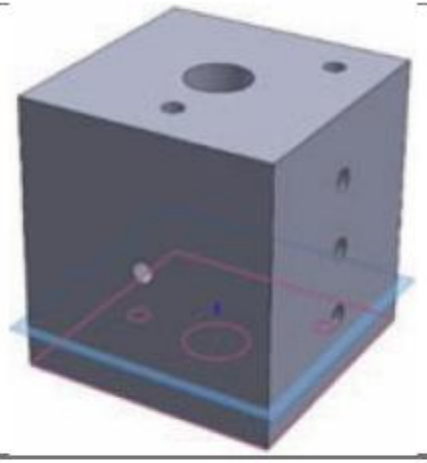
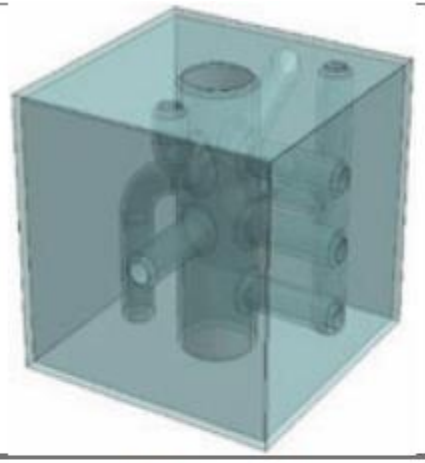


FIG. 1. An example of a chainmail fabric created with traditional 3D printing.[6] Color images available online at www.liebertpub.com/3dp

قابلیت‌های AM در طراحی: بازطراحی

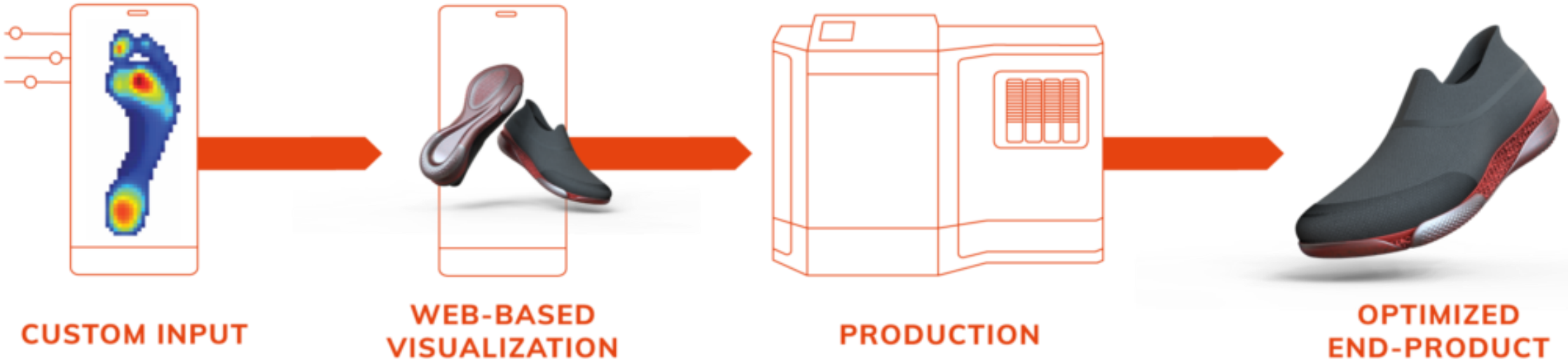
- امکان تغییر طراحی تا

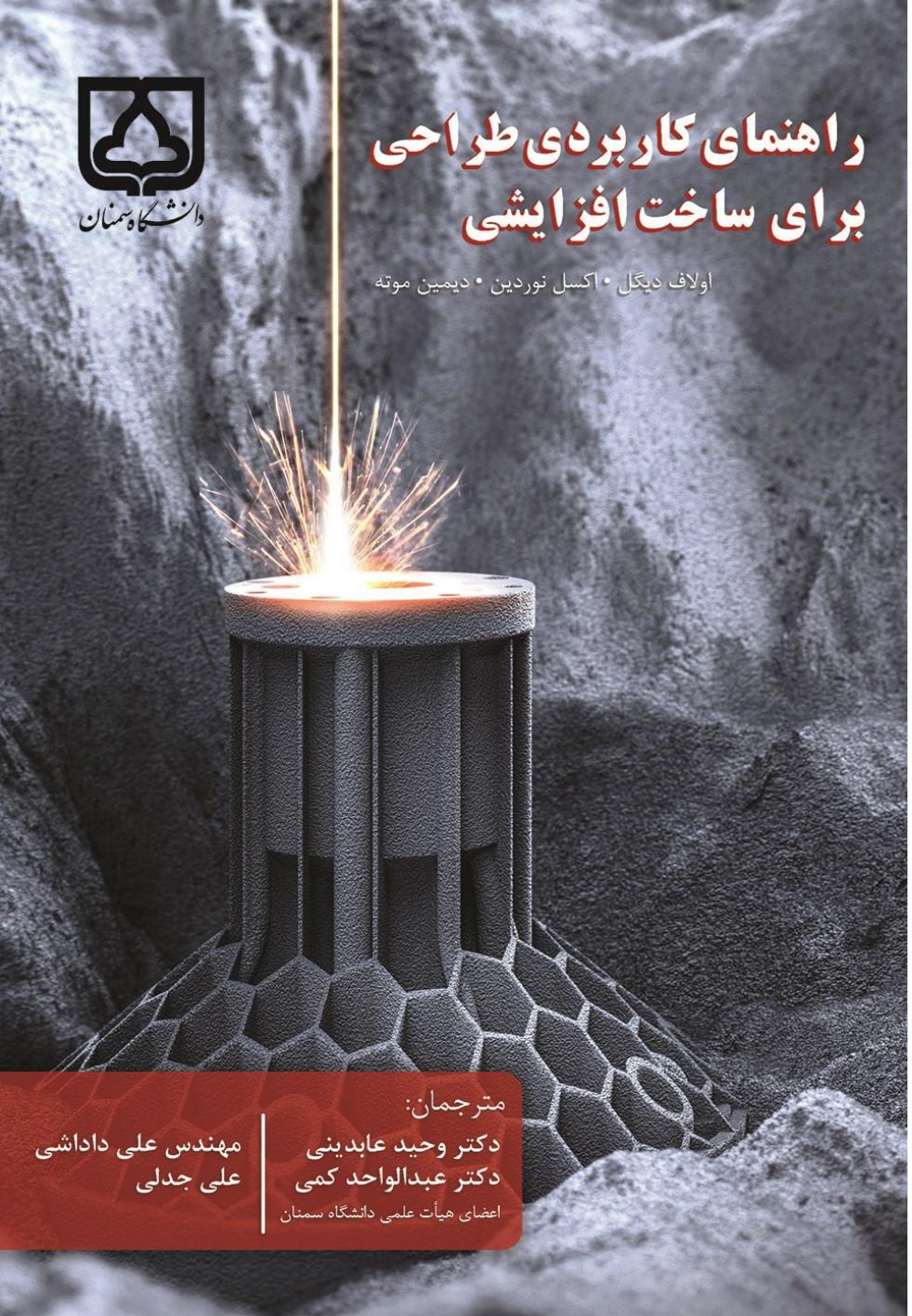
قبل از شروع ساخت قطعه

			
	منیفولد بلوکی	منیفولد بلوکی تبدیل شده به پوسته	طراحی بهینه‌سازی شده منیفولد برای AM
زمان پیمایش برای الگوی هاشور	۱۹۱ ساعت و ۱ دقیقه و ۳۳ ثانیه	۳۶ ساعت و ۳۱ دقیقه و ۲۱ ثانیه	۱۹ ساعت و ۴۰ دقیقه و ۳۹ ثانیه
هزینه دستگاه در فلز با قیمت ۶۵ دلار در ساعت	۱۲/۴۱۵ دلار	۲،۳۷۹/۰۰ دلار	۱،۲۶۱/۰۰ دلار
وزن مواد	۷/۴۴۱ کیلوگرم	۱/۲۳۲ کیلوگرم	۰/۵۵۸ کیلوگرم
هزینه مواد با احتساب هر کیلو ۷۰ دلار + ۱۰٪ اتلاف	۵۷۰/۶۴ دلار	۹۴/۸۶ دلار	۴۲/۹۶ دلار
بهای رسمی اعلام شده قطعه از جنس فولاد ضد زنگ 316L	۱۵،۲۹۳/۸۲ دلار	۳،۷۳۵/۱۲ دلار	۱،۹۸۶/۲۵ دلار

قابلیت‌های AM در طراحی: طراحی ویژه تجاری

- شخصی سازی محصولات





طراحی برای ساخت افزایشی

- منابع سودمند برای طراحی قطعات فلزی ساخت افزایشی:

- Design guide for additive manufacturing of metal components by SLM process

Prof. Olaf Diegel

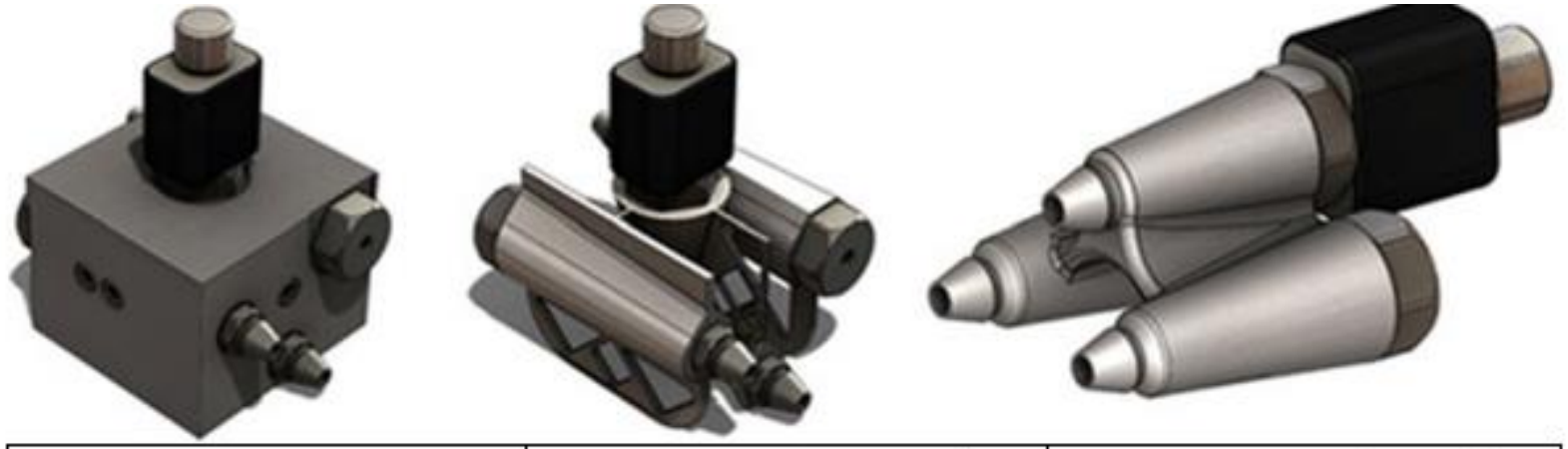
طراحی برای ساخت افزایشی

- AM تمام محدودیت‌های تولید را حذف نمی‌کند. در عوض آنها را با مجموعه‌ای از ملاحظات طراحی جایگزین می‌کند که طراحان برای ایجاد ارزش افزوده در محصولات خود باید آنها در نظر بگیرند.
- در غیر این صورت AM می‌تواند به روشی کُند و غیراقتصادی در تولید محصولات یا قطعات تبدیل شود.

طراحی برای AM	سازگاری برای AM	تعویض قطعه
برای به حداکثر رساندن مزایای AM و نحوه پرینت آن، یک قطعه به صورت کامل دوباره طراحی می‌شود. نحوه قرارگیری قطعه در محصول و نحوه عملکرد آن مجدداً مورد بررسی قرار می‌گیرد و برای بهبود آن تلاش می‌شود.	تغییراتی در فرم قطعه ایجاد می‌شود که اغلب در داخل آن صورت می‌گیرد تا ساخت آن از طریق AM آسانتر شود. شکل خارجی قطعه نیز ممکن است تغییر کند، اما کاربرد، عملکرد، و چگونگی قرارگیری آن در محصول.	این مورد هنگامی استفاده می‌شود که ایجاد تغییر در قطعه مطلقاً غیرمجاز باشد، و قطعه باید تا حد ممکن نزدیک به قطعه اصلی باز تولید شود. این روش برای تولید قطعات یدکی استفاده می‌شود که زمان فرایند تولید به اندازه کافی، استفاده از AM، را توجیه می‌کند.

شکل ۳-۱ تمایز بین AM برای تعویض قطعه، سازگاری برای AM و طراحی برای AM

طراحی برای ساخت افزایشی



طراحی برای AM	سازگاری با AM	تعویض مستقیم قطعه
۰/۴ کیلوگرم ٪۹۱ صرفه جویی در وزن. جریان سیال بهبود یافته و متناسب با محصول است. فضای کمتری در محصول اشغال می‌کند و مونتاژ آن آسانتر است.	۱ کیلوگرم ٪۷۸ صرفه جویی در وزن.	۴/۶ کیلوگرم

شکل ۳-۲ رویکردهای طراحی برای منیفولد، (Marc Saunders, Renishaw)

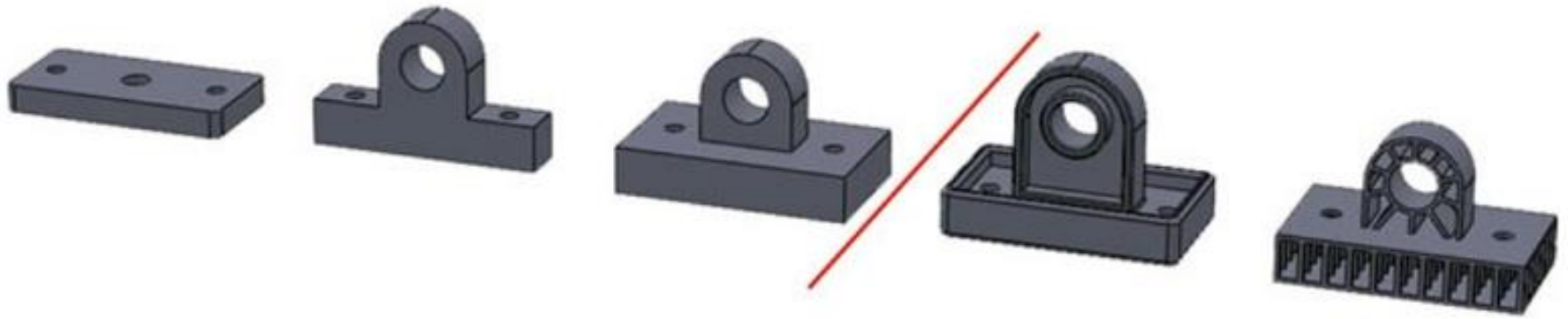
دستورالعمل‌های عمومی

- قانون اول: **بستگی دارد.**
- مثلاً **حداقل اندازه سوراخ یا شکاف** در یک قطعه تولید شده به روش SLS: به **ضخامت قطعه کار بستگی** دارد.
- با افزایش ضخامت، پودر مازاد در سوراخ‌های باریک تا حدی ذوب شده و جدا کردن آنها غیرممکن می‌شود.
- در انطباق آزاد بین **اجزای متحرک**، هرچه **مساحت** سطح قطعات در تماس بزرگتر باشد، **فاصله** بین قطعات متحرک بزرگتر خواهد بود.

شکل ۳-۳ اندازه سوراخ بستگی به ضخامت مواد دارد

دستورالعمل‌های عمومی

- قانون دوم: **آیا در وهله اول باید از AM استفاده شود؟**
- قطعات ساده در سمت چپ خط قرمز را می‌توان به راحتی از طریق برش لیزری، برش واترجت، پانچ، ماشینکاری با CNC و غیره ساخت. با این وجود قطعات پیچیده‌تر در سمت راست خط قرمز می‌توانند برای تولید به صورت مرسوم سخت باشد، بنابراین برای AM ایده‌آل است.



شکل ۳-۴ فیلتر گزینش پیچیدگی

دستورالعمل‌های عمومی

- قانون سوم: **افزایش زیبایی هزینه مازاد ندارد!**
- اضافه کردن جزئیات تزئیناتی مفید، لوگوها، دستورالعمل‌ها، شماره قطعات و غیره هزینه مازاد ندارد. این جزئیات می‌تواند به آسان‌تر شدن مونتاژ و شناسایی برند محصول کمک کند.

دستورالعمل‌های عمومی

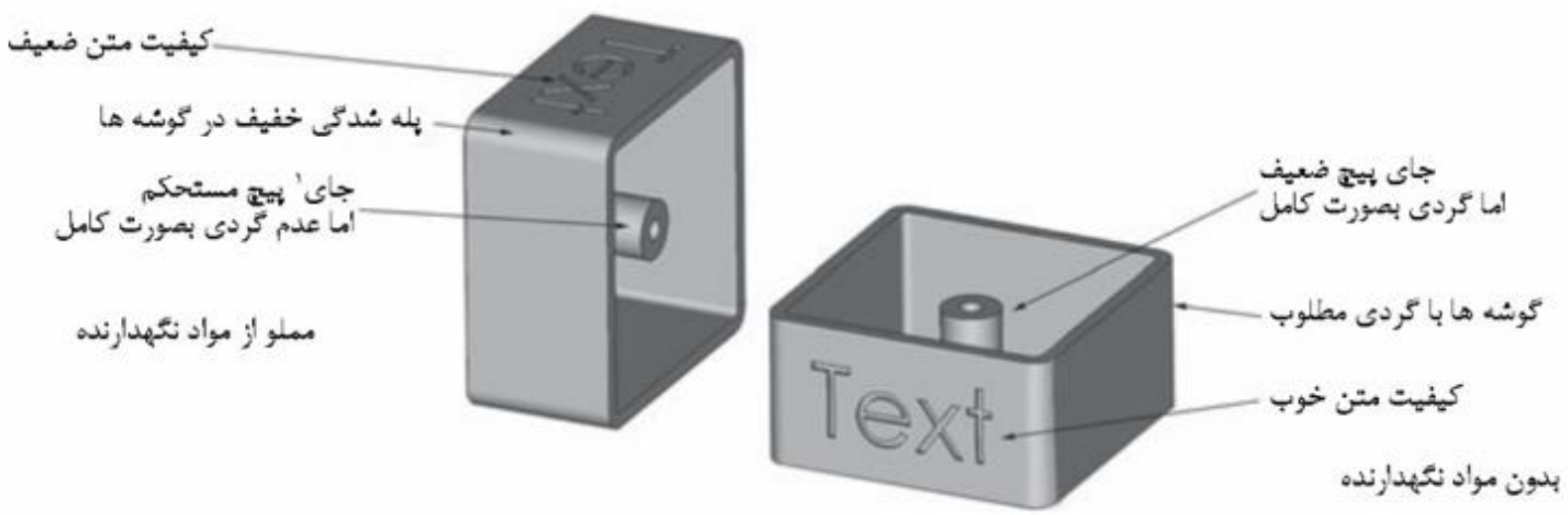
- قانون چهارم: **تمام گوشه‌ها گرد ساخته شود.**
- این موضوع دو نتیجه دارد:
  - اول: به علت از بین رفتن خطر لبه‌های تیز، محصول پرینت شده **راحتی و ارگونومی** بیشتری برای نگهداری و استفاده پیدا می‌کند.
  - دوم: **تمرکز تنش** در گوشه‌های تیز **کاهش** یافته و استحکام محصول بیشتر می‌شود.

دستورالعمل‌های عمومی

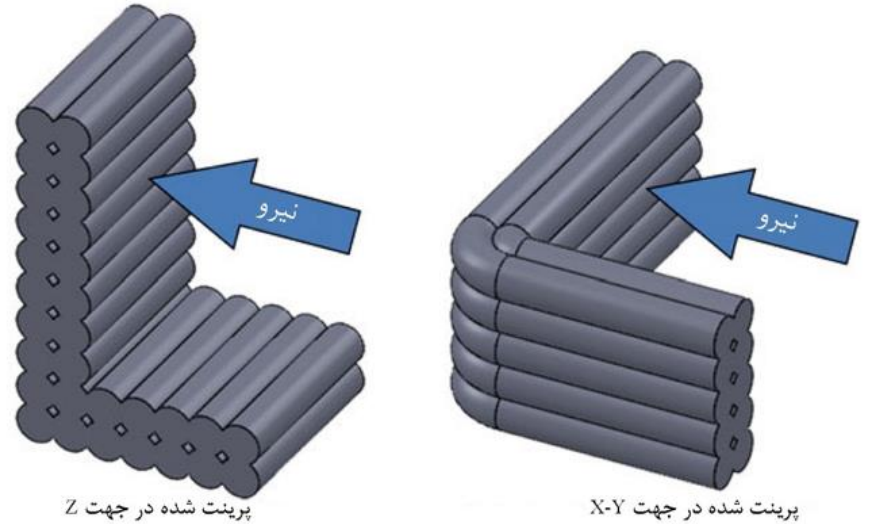
- قانون پنجم: **بدون توجه به جهت پرینت، نمی‌توان طراحی برای AM انجام داد.**
- جهت **ناهمسانگردی**: اگر ناهمسانگردی یک عامل مهم است، قطعه باید به گونه‌ای طراحی شود که حداکثر استحکام برای پرینت افقی را فراهم کند.
- **گرد بودن سوراخ‌ها**: سوراخ‌ها در جهت عمودی پرینت شوند. پرینت سوراخ‌ها به صورت افقی باعث پله‌ای شدن و همچنین بیضوی شدن آنها خواهد شد.
- **ارتفاع کل سازه**: مشخص‌کننده تعداد لایه‌های مورد نیاز و در نتیجه زمان پرینت (هزینه) است. معمولاً بهترین جهت پرینت جهتی است که **ارتفاع کل سازه** در آن به **حداقل** برسد.

دستورالعمل‌های عمومی

- قانون پنجم: **بدون توجه به جهت پرینت، نمی‌توان طراحی برای AM انجام داد.**



شکل ۳-۵ برخی از تاثیرات پرینت یک قطعه در دو جهت متفاوت



شکل ۳-۶ ناهمسانگردی یا ضعف بین لایه‌ها منجر به واکنش متفاوت در اثر نیروهای مختلف می‌شود

دستورالعمل‌های عمومی

- قانون ششم: **طراحی برای به حداقل رساندن توده‌های بزرگ ماده**
- حجم زیاد مواد در یک ناحیه قطعه هزینه زیادی ایجاد می‌کند (افزایش تنش پسماند و کاهش ارزش افزوده).
- قانون ضخامت یکنواخت

دستورالعمل‌های عمومی

- قانون هفتم: **طراحی برای به حداقل رساندن تکیه‌گاه‌ها**
- استفاده از تکیه‌گاه و میزان مواد تکیه‌گاه به شدت بر کیفیت قطعه و هزینه پس‌پردازش آن تأثیر می‌گذارد.
- طراحی قطعه و جهت پرینت، روی مقدار و موقعیت تکیه‌گاه تأثیر می‌گذارد.

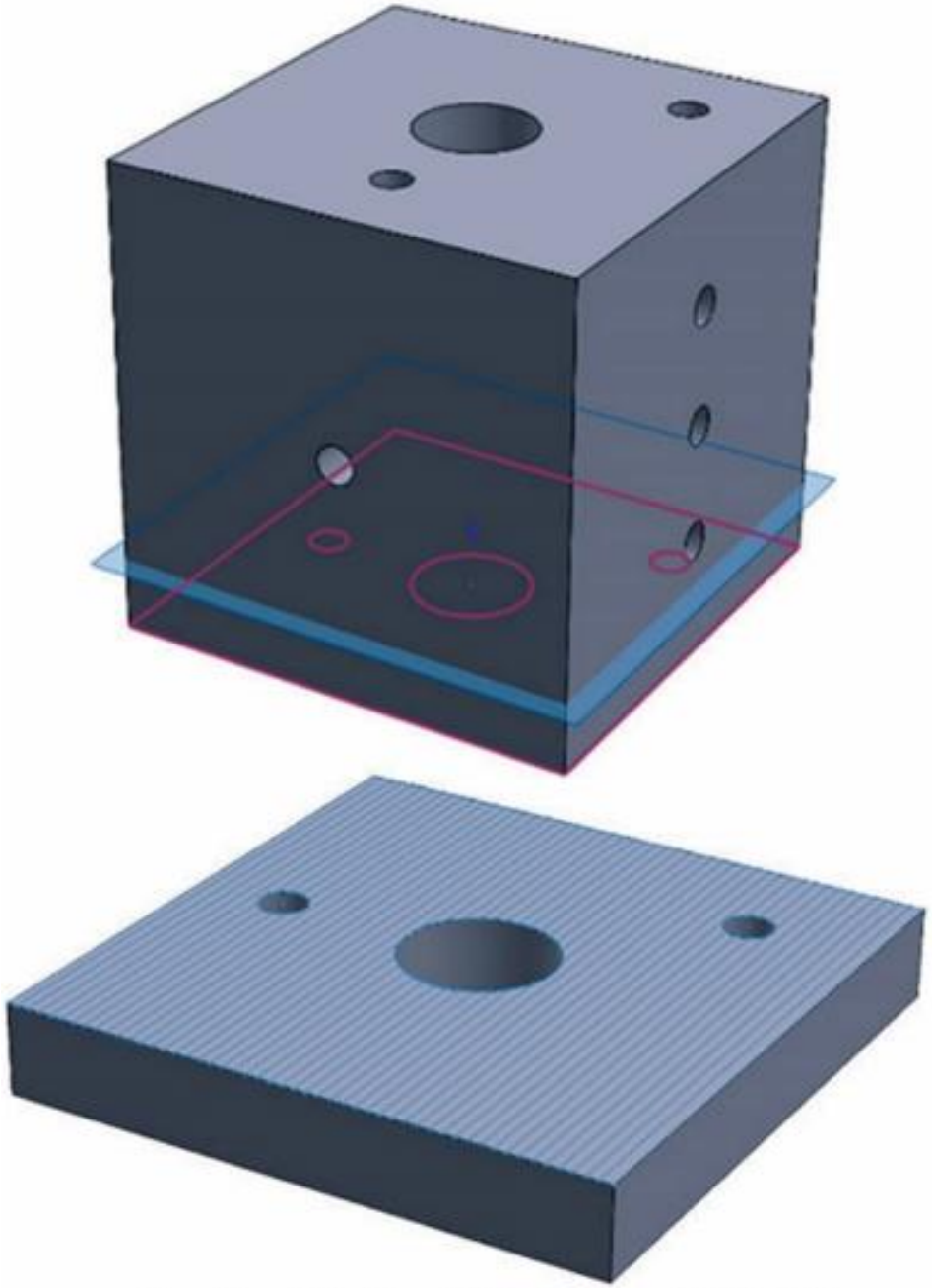
طراحی برای به حداقل رساندن زمان پرینت

- برخی عوامل در تولید قطعات فلزی AM وجود دارند که زمان‌بر بوده ولی تحت تأثیر طراحی قطعه نیستند. در نتیجه باعث افزایش هزینه می‌شوند.

مراحل مختلفی که در AM فلز و در کل زمان پرینت تحت تاثیر طراحی قطعه هستند.

مرحله فرایند AM	تحت تاثیر طراحی
پیش پردازش	
• بررسی کیفیت فایل‌ها و تعمیر در صورت لزوم.	خیر
• آماده‌سازی پرینت در نرم‌افزار با ساماندهی قطعات روی بستر ساخت.	خیر
پرینت	
• تمیز کردن سیستم AM.	خیر
• پاکسازی سیستم از اکسیژن.	خیر
• عملیات پیش‌گرم سیستم AM	خیر
• پرینت قطعات	خیر
- پخش لایه پودر (زمان بازپوشانی).	خیر
- خطوط کانتور[1] لیزر.	بله
- الگو هاشور لیزر.	بله
• جداسازی بستر ساخت از دستگاه.	خیر
• بازیافت پودر.	خیر
پس‌پردازش	
• آزادسازی تنش حرارتی.	بله
• جداسازی قطعات از صفحه ساخت.	خیر
• پرس ایزواستاتیک گرم.	خیر
• حذف ساختارهای نگهدارنده.	بله
• عملیات حرارتی.	بله
• ماشینکاری سطحی، ساچمه زنی[2]، ماشینکاری با جریان ساینده و غیره.	خیر
• بازرسی.	خیر

طراحی برای به حداقل رساندن زمان پرینت

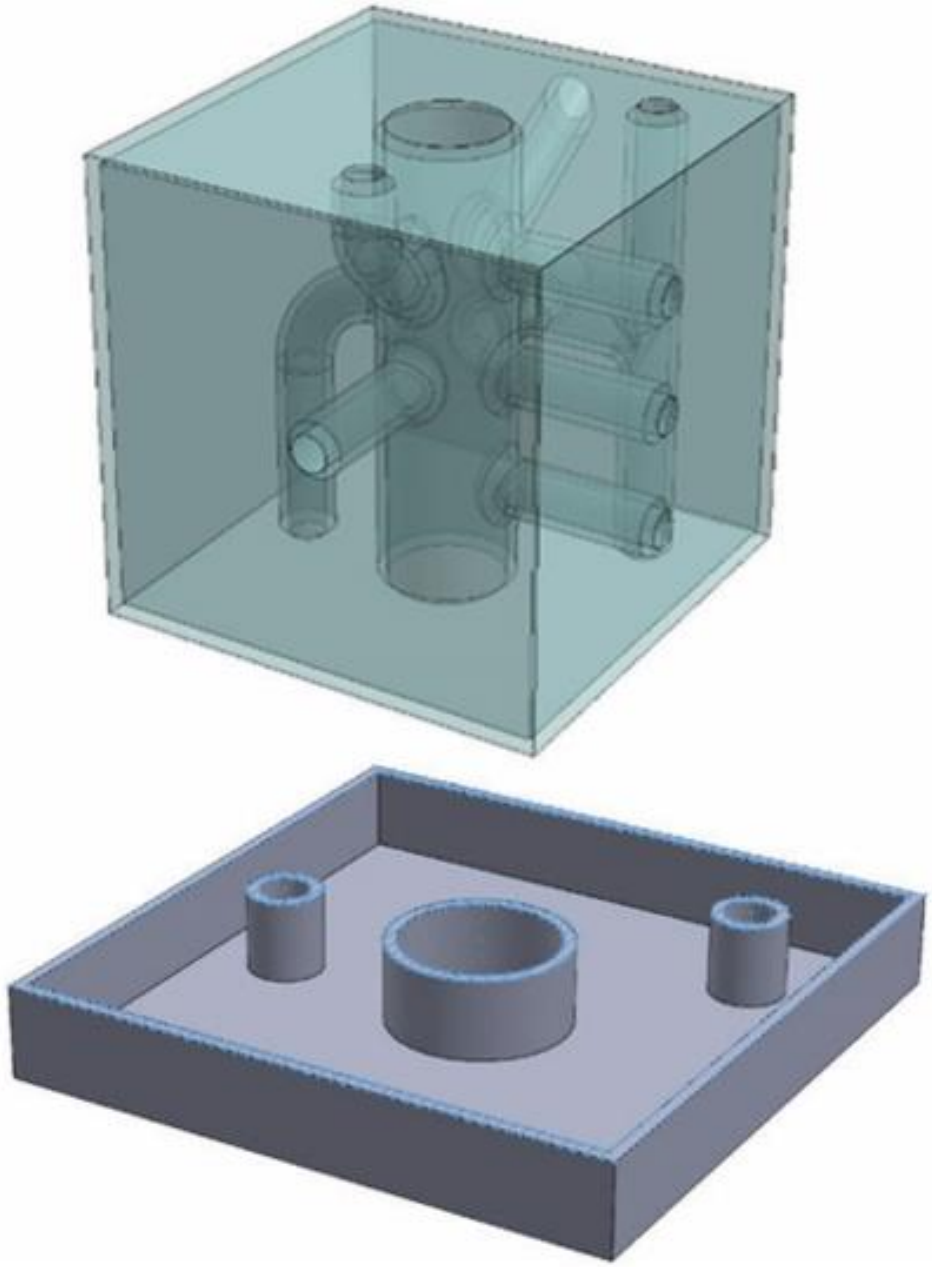


شکل ۳-۹ الگوی پیمایش برای لایه منیفولد توپر طراحی شده

- اگر اندازه منیفولد ۱۰۰ در ۱۰۰ میلی‌متر و فاصله هاشور ۰/۱ میلی‌متر باشد:
  - مسیر پیمایش لیزر در هر لایه ۱۰۰ متر
  - اگر لیزر با سرعت ۳۳۰ میلی‌متر در ثانیه حرکت کند، اسکن لایه ۳۰۰ ثانیه (۵ دقیقه) طول می‌کشد.
  - ۵/۴۱ دلار هزینه استفاده از دستگاه (متوسط ۶۵ دلار در ساعت)
  - با در نظر گرفتن ضخامت لایه ۵۰ میکرومتر (که نسبتاً ضخیم است)، قطعه ۲۰۰۰ لایه دارد. بنابراین تنها هزینه زمان پیمایش لیزر برای آن ۱۰،۸۲۰ دلار است.

طراحی برای به حداقل رساندن زمان پرینت

- اگر ضخامت قطعه به ۲ میلی‌متر کاهش یابد:
  - مسیر پیمایش لیزر در هر لایه ۴/۵ متر
  - اسکن لایه ۱۳/۶ ثانیه طول می‌کشد.
  - ۰/۲۴ دلار هزینه استفاده از دستگاه (متوسط ۶۵ دلار در ساعت)
  - هزینه زمان پیمایش لیزر ۴۸۰ دلار
- هرچه قطعه در جهت عمودی بلندتر باشد، لایه‌های بیشتری داشته و زمان بیشتری برای بازپوشانی و پیش‌گرم کردن لایه‌ها لازم است.
- جهت پرینت بر خواص مکانیکی، دقت هندسه، صافی سطح و تکیه‌گاه تأثیر می‌گذارد.



شکل ۳-۱۰ الگوی پیمایش برای لایه منیفولد پوسته ای طراحی شده

طراحی برای به حداقل رساندن پس‌پردازش

مراحل طراحی مجدد قطعات برای ساخت با AM:

۱. فقط بخش‌هایی که برای عملکرد قطعه ضروری هستند، حفظ شوند.

۲. در مورد نحوه اتصال بخش‌های مختلف تصمیم‌گیری شود.

۳. مناسب‌ترین جهت پرینت با توجه به اهداف انتخاب شود.

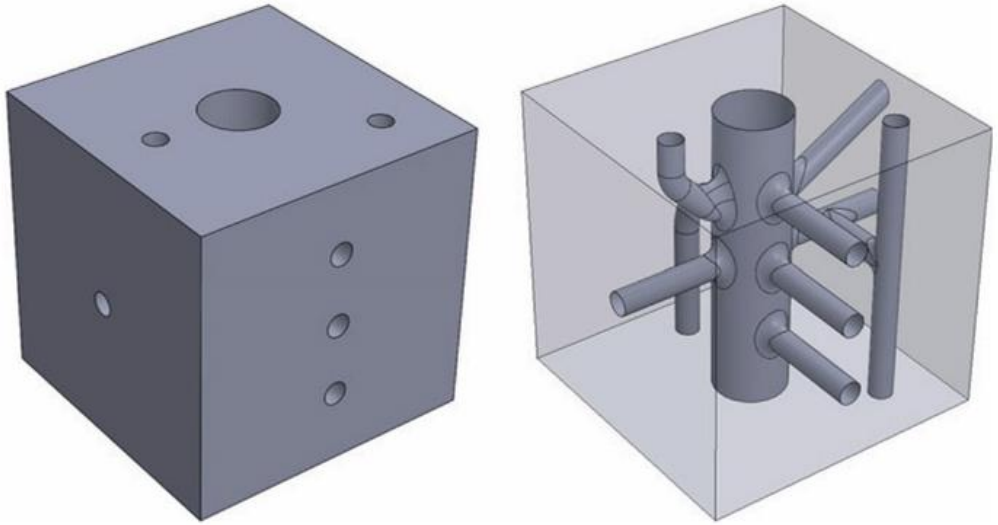
۴. نتایج تولید تکیه‌گاه در نرم‌افزار مورد بررسی قرار گیرند.

- جایگزینی تکیه‌گاه‌های موقت با دیواره‌های دائمی.
- تغییر زاویه قسمت‌هایی که نیاز به نگهدارنده دارند (در صورت امکان پخ زنی و زاویه دادن به سطوح افقی)

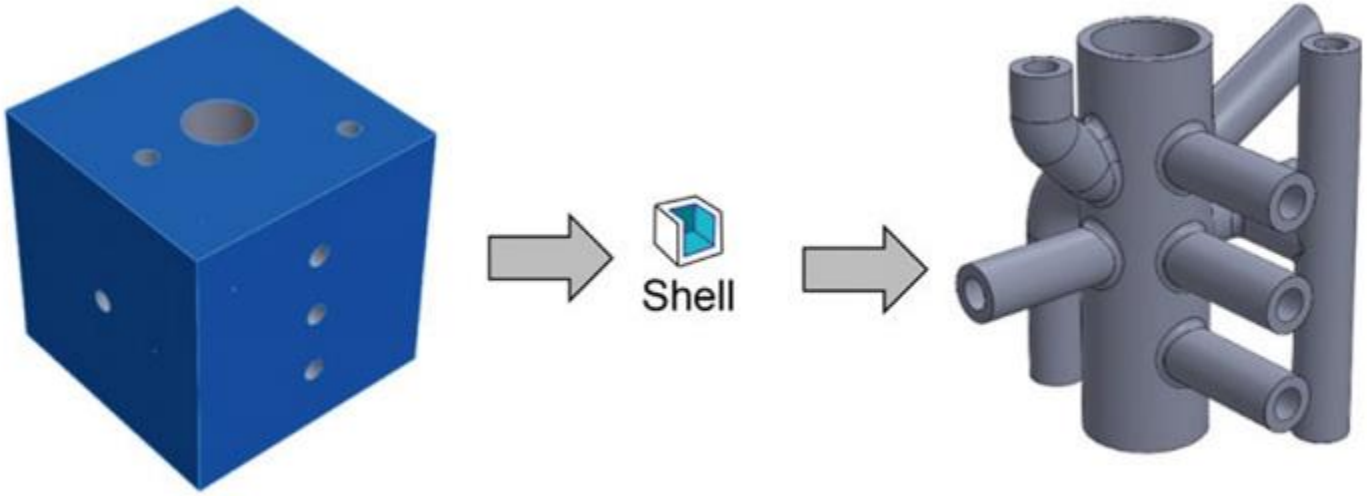
۵. تکرار فرایند.

طراحی برای به حداقل رساندن پس‌پردازش

۱. فقط بخش‌هایی که برای عملکرد قطعه ضروری هستند، حفظ شوند.

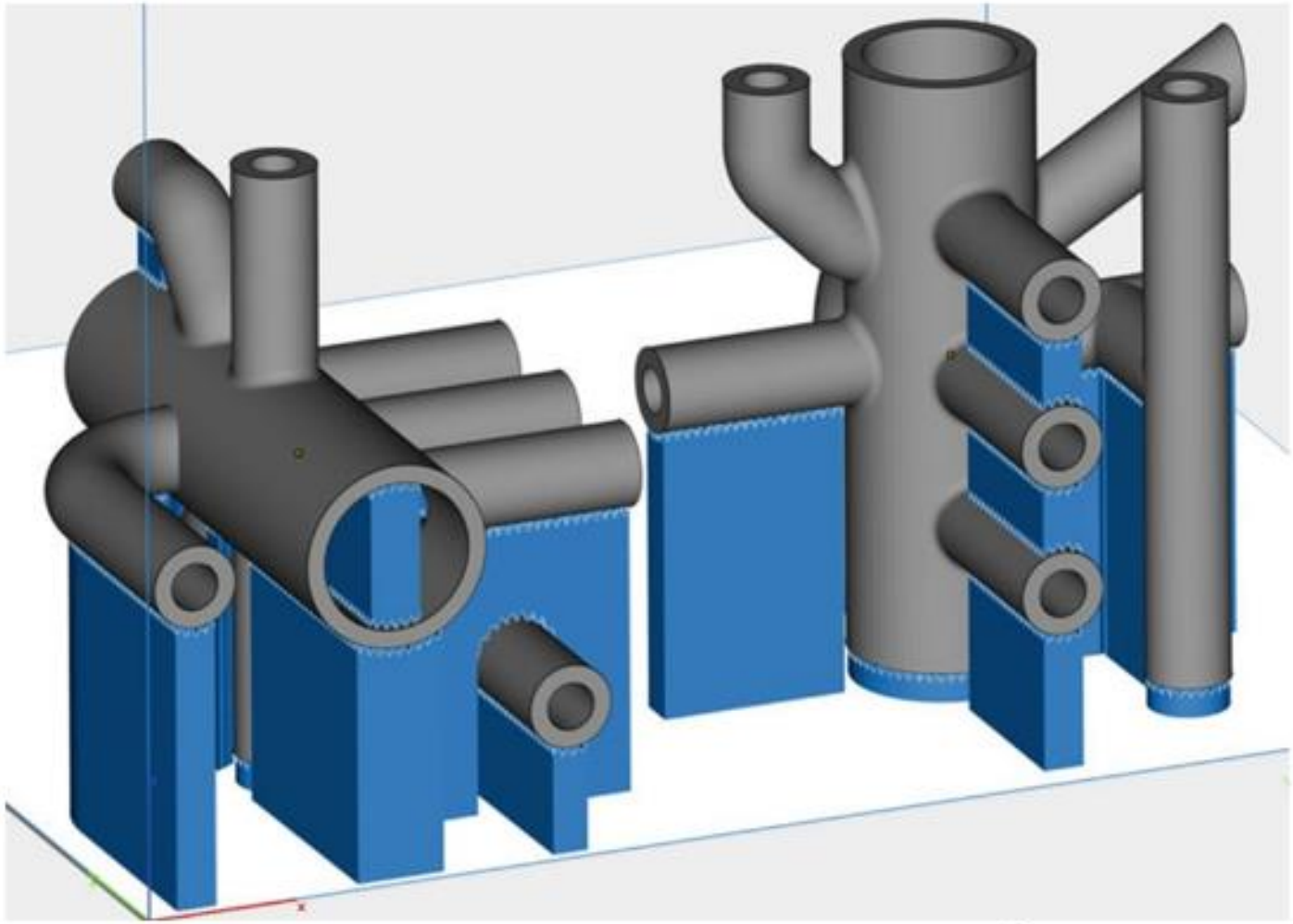


شکل ۳-۱۱ بلوک ساده منیفولد طراحی شده فقط با کانال‌های داخلی و خارجی مورد نیاز



شکل ۳-۱۲ طراحی منیفولد پس از عملیات پوسته ای کردن بر روی طرح بلوک

طراحی برای به حداقل رساندن پس‌پردازش



شکل ۳-۱۳ نگهدارنده مورد نیاز طرح بلوک پوسته‌ای در دو جهت پرینت مختلف

۲. در مورد نحوه اتصال بخش‌های مختلف تصمیم‌گیری شود.

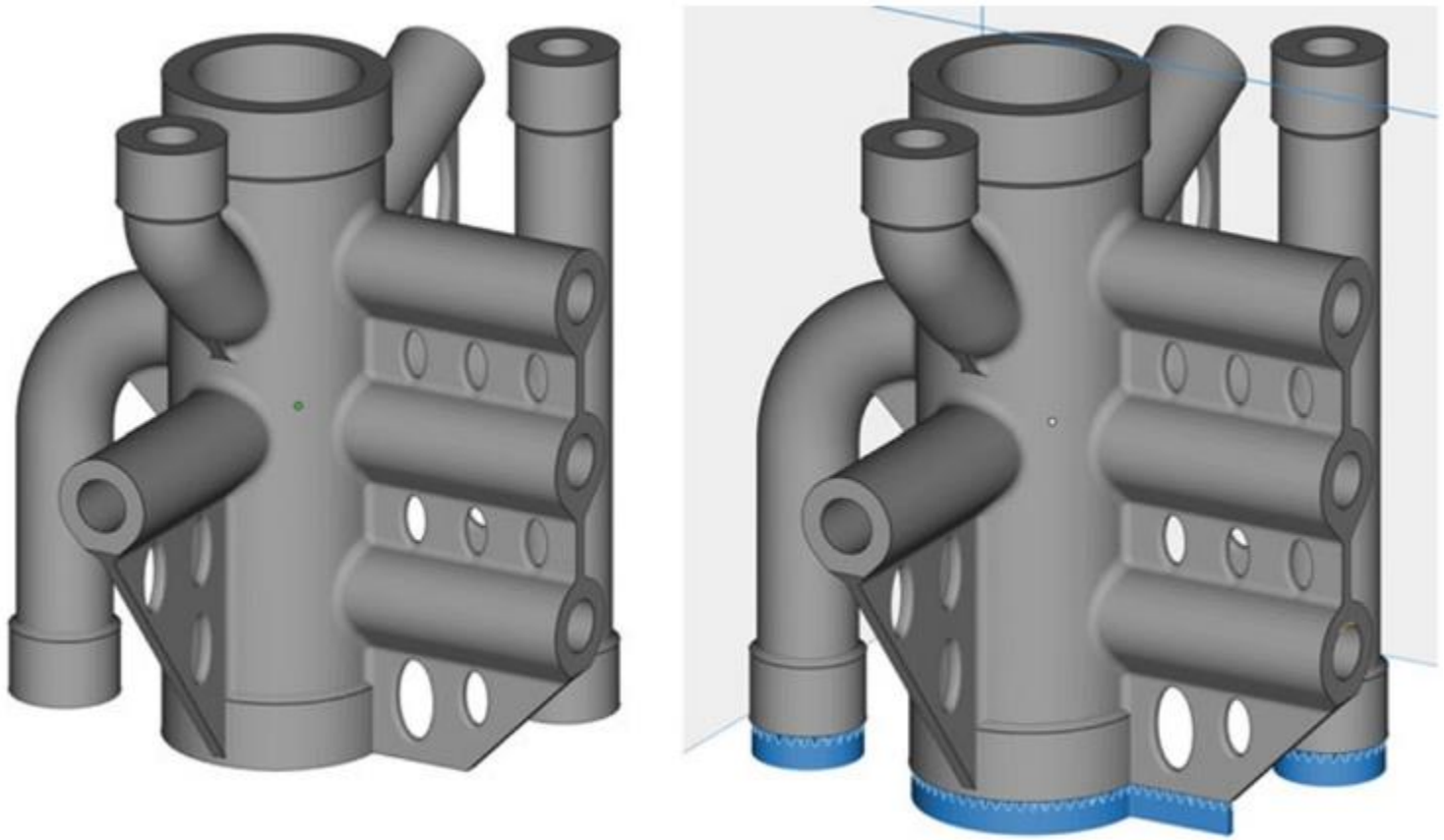
اگر نیاز است نحوه اتصال لوله‌ها در بلوک اولیه بازطراحی شود و مرحله قبل تکرار شود.

۳. مناسب‌ترین جهت پرینت با توجه به اهداف انتخاب شود.

طراحی برای به حداقل رساندن پس‌پردازش

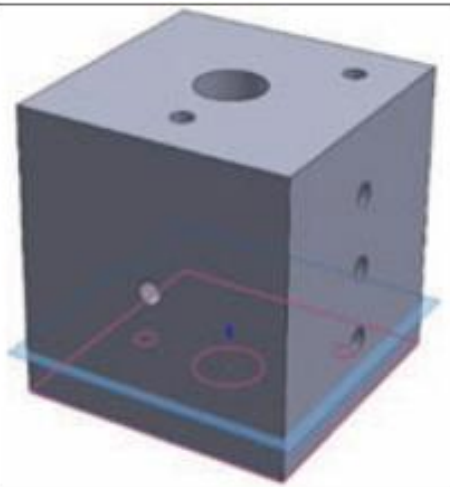
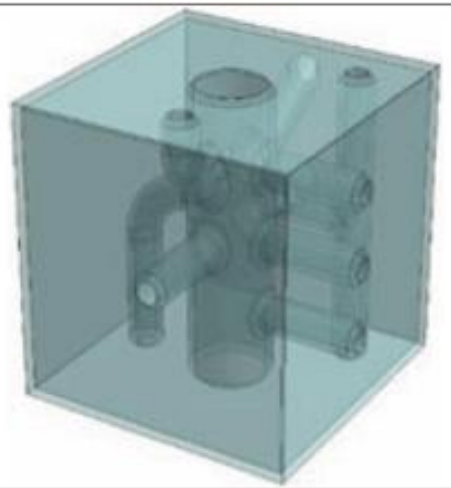
- دیواره‌های پایین ۴۵ درجه پخ زده شده‌اند و سوراخ‌های بیضی شکل برای کاهش وزن بدون نیاز به مواد نگهدارنده در دیواره‌ها اضافه شده است.
- در طراحی جدید، تنها برای چسبیدن قطعه به بستر ساخت به نگهدارنده نیاز است.

- افزودن چنین دیواره‌های نگهدارنده می‌تواند باعث افزایش استحکام مکانیکی نیز شود.
- هنگامی که قطعه از بستر ساخت به وسیله سیم ماشینکاری تخلیه الکتریکی یا با اره جدا می‌شود، به غیر از یک فرایند ساچمه زنی سریع، و یا قلاویززنی قسمت‌هایی که نیاز به رزوه دارند، قطعه تقریباً آماده کار است.



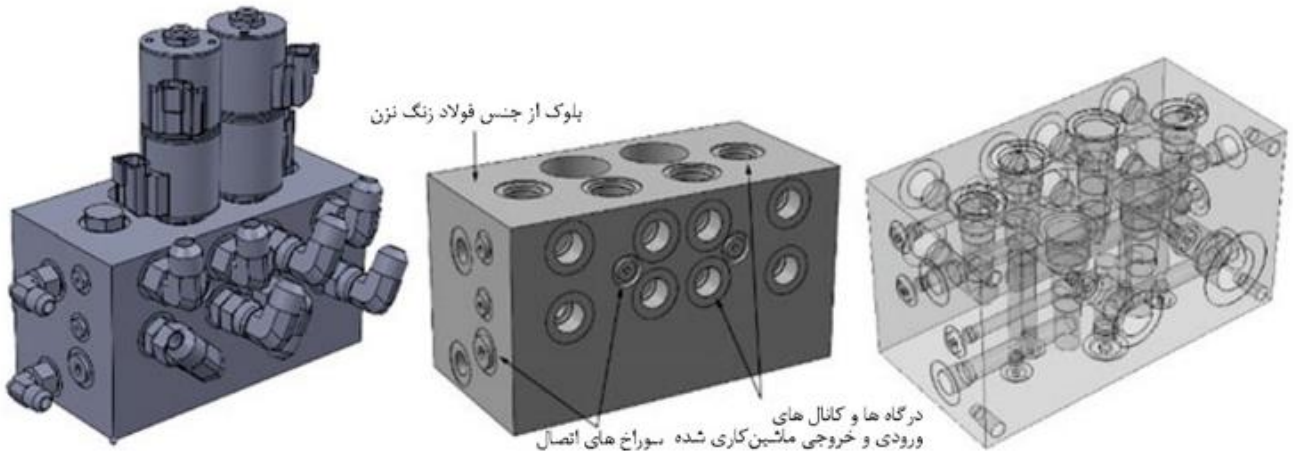
شکل ۳-۱۴ نگهدارنده مورد نیاز برای طراحی AM فلز بهینه شده

طراحی برای به حداقل رساندن پس‌پردازش

			
	منیفولد بلوکی	منیفولد بلوکی تبدیل شده به پوسته	طراحی بهینه‌سازی شده منیفولد برای AM
زمان پیمایش برای الگوی هاشور	۱۹۱ ساعت و ۱ دقیقه و ۳۳ ثانیه	۳۶ ساعت و ۳۱ دقیقه و ۲۱ ثانیه	۱۹ ساعت و ۴۰ دقیقه و ۳۹ ثانیه
هزینه دستگاه در فلز با قیمت ۶۵ دلار در ساعت	۱۲/۴۱۵ دلار	۲،۳۷۹/۰۰ دلار	۱،۲۶۱/۰۰ دلار
وزن مواد	۷/۴۴۱ کیلوگرم	۱/۲۳۲ کیلوگرم	۰/۵۵۸ کیلوگرم
هزینه مواد با احتساب هر کیلو ۷۰ دلار + ۱۰٪ اتلاف	۵۷۰/۶۴ دلار	۹۴/۸۶ دلار	۴۲/۹۶ دلار
بهای رسمی اعلام شده قطعه از جنس فولاد ضد زنگ 316L	۱۵،۲۹۳/۸۲ دلار	۳،۷۳۵/۱۲ دلار	۱،۹۸۶/۲۵ دلار

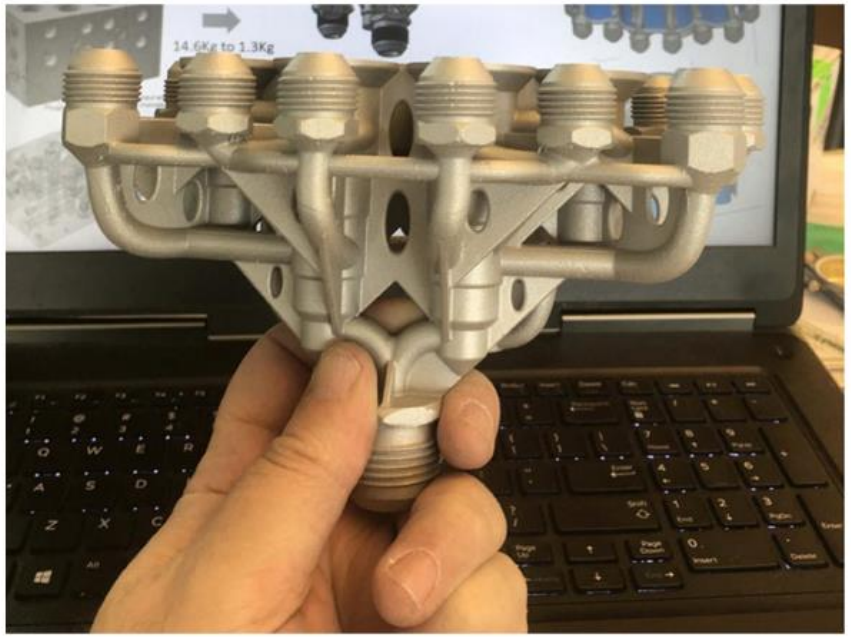
طراحی برای به حداقل رساندن پس‌پردازش

نمونه‌ای از منیفولد هیدرولیکی مورد استفاده در یک دستگاه حفاری زیرزمینیAtlas Copco، که با استفاده از تکنیک‌های فوق وزن آن بیش از ۹۰٪ کاهش یافته و عملکرد آن بسیار بهتر شده است.

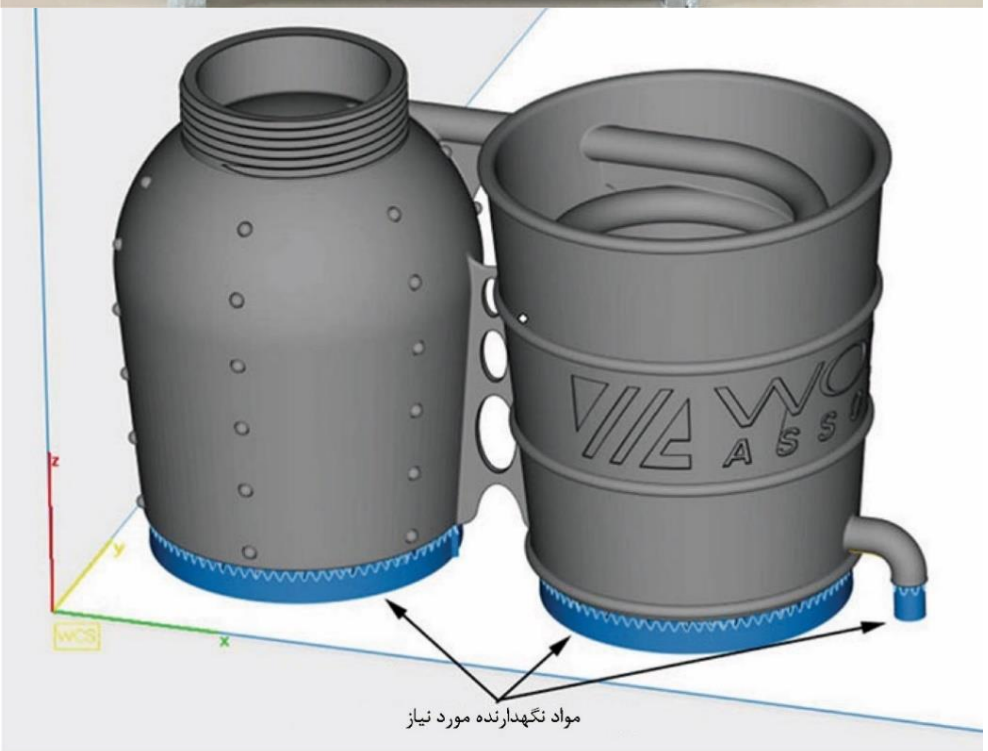


شکل ۳-۱۶ طرح اصلی بلوک منیفولد Atlas Copco

شکل ۳-۱۷ منیفولد هیدرولیکی برای AM با پودر خارج‌سازی نشده (سمت چپ)، ساختارهای نگهدارنده متصل (وسط) و مواد نگهدارنده جدا شده (راست) طراحی شده است



شکل ۳-۱۸ منیفولد هیدرولیک ساخته و پرداخت شده با AM



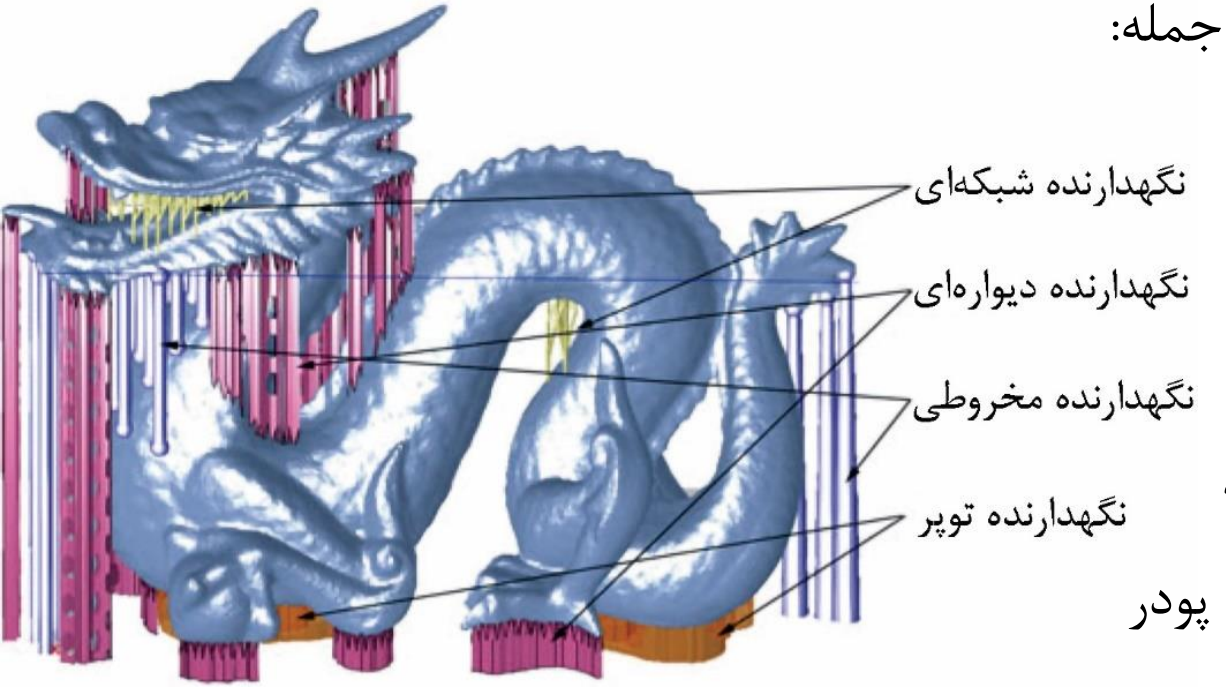
طراحی برای به حداقل رساندن پس‌پردازش

- یک دستگاه تقطیر کوچک رومیزی می‌تواند نمونه خوبی از طراحی برای AM باشد.
- سعی شده **بدون استفاده از مواد نگهدارنده** به غیر از آنچه برای چسبیدن آن به بستر ساخت لازم است، یک دستگاه تقطیر کوچک طراحی شود.
- اندازه دستگاه تقطیر ۱۱۷ × ۵۸ (قطر بشکه‌ها) × ۶۶ (ارتفاع) میلی‌متر است.

طراحی برای به حداقل رساندن پس‌پردازش

- از هرگونه برآمدگی با مساحت بیش از چند میلی‌متر مربع و همچنین از اجزاء با زاویه بیشتر از ۴۵ درجه (نسبت به راستای عمود) باید پرهیز شود. زیرا در این صورت به تکیه‌گاه نیاز خواهد بود.
- این زاویه بسته به ماده پرینت می‌تواند متفاوت باشد.

طراحی برای ساخت افزایشی فلزات: برآمدگی‌ها و تکیه‌گاه‌ها

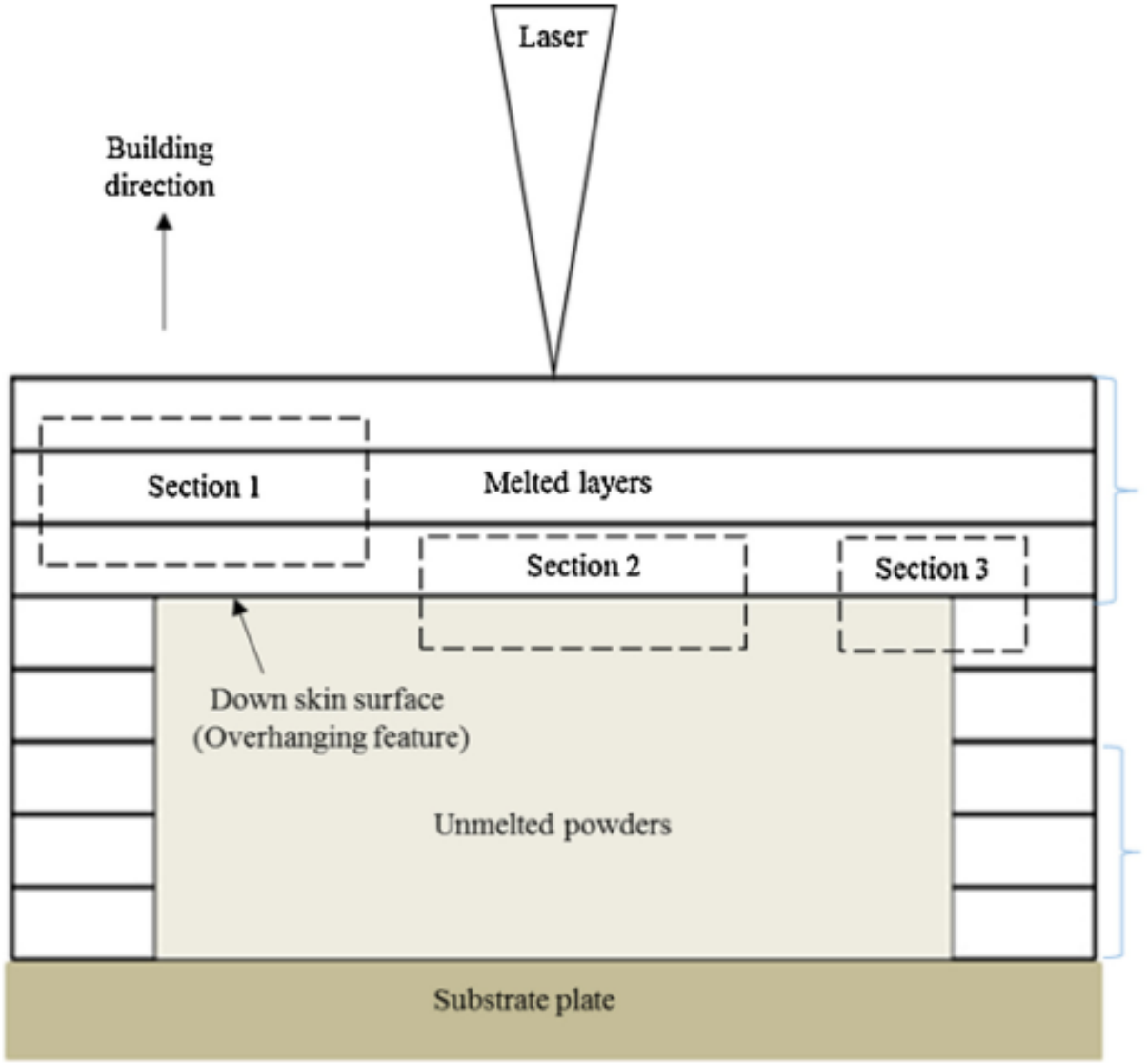


✓ **تکیه‌گاه‌ها** در AM فلزات عملکردهای مختلفی دارند، از جمله:

- نگهداری از قطعه در صورت وجود برآمدگی‌ها
- تقویت و نگه‌داشتن قطعه بر روی بستر ساخت
- دور کردن گرمای مازاد
- جلوگیری از تاب برداشتن یا خراب شدن کامل قطعه
- جلوگیری از ریزش حوضچه مذاب و فرو رفتن آن در پودر
- مقاومت در برابر نیروی مکانیکی مکانیزم پخش پودر روی قطعه

✓ **جهت قطعه** را باید با در نظر گرفتن **کمترین زمان ساخت**، **جداسازی آسان** نگهدارنده‌ها (به ویژه از داخل قطعه)، **کیفیت سطحی** و **جلوگیری تاب برداشتن** قطعه در نظر گرفت.

طراحی برای ساخت افزایشی فلزات: برآمدگی‌ها و تکیه‌گاه‌ها

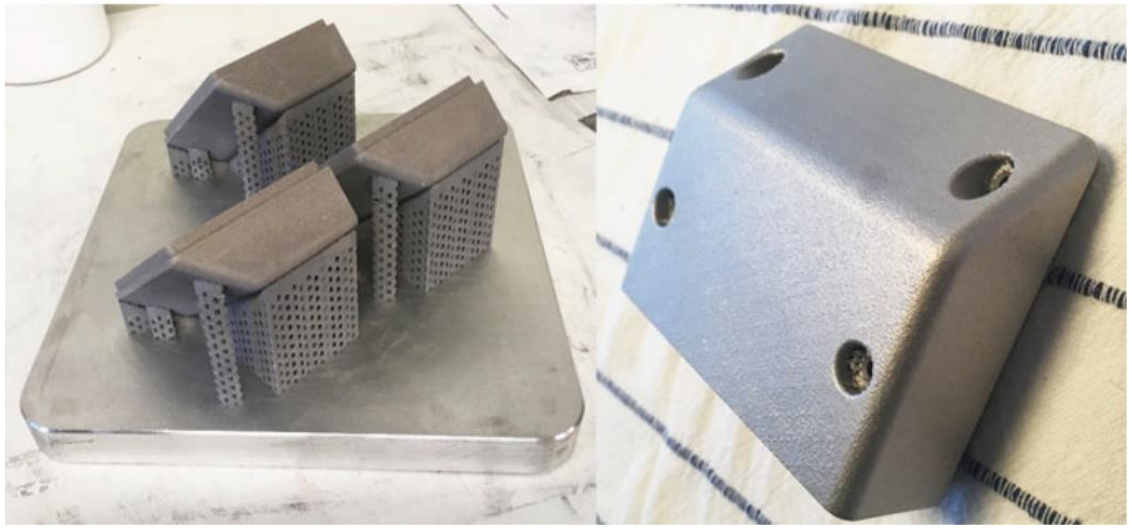


- ✓ ایجاد تنش‌های کششی یا فشاری به دلیل تفاوت در هدایت گرما در نقاط بالا و پایین یک لایه و درنتیجه اعوجاج قطعه
- ✓ امکان ایجاد ساختارهای متفاوت به دلیل هدایت گرمایی متفاوت در نقاط مختلف
- ✓ نیاز به تکیه‌گاه برای هدایت حرارتی یکنواخت تر (به ویژه در برآمدگی‌ها)
- ✓ نیاز به تکیه‌گاه برای برآمدگی‌های با زاویه بزرگتر از ۴۵ درجه

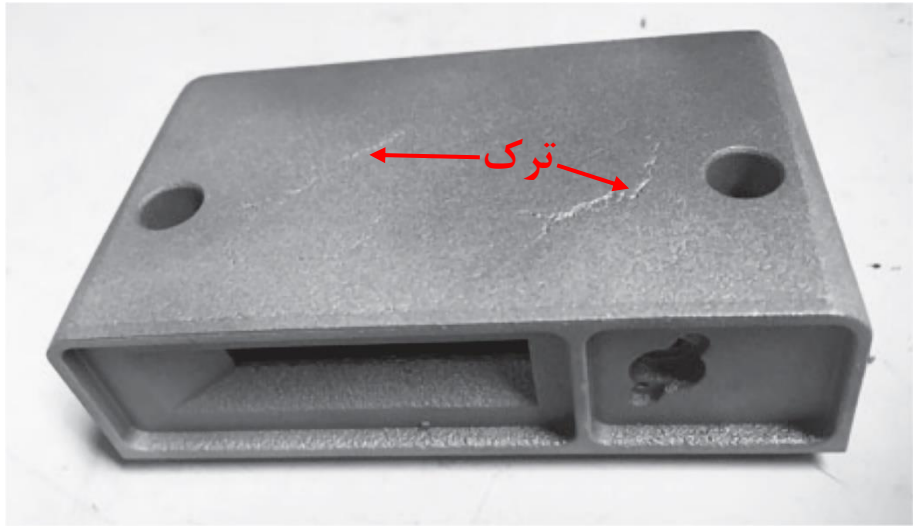
http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.08.006

طراحی برای ساخت افزایشی فلزات: برآمدگی‌ها و تکیه‌گاه‌ها

- ✓ **نیاز به تکیه‌گاه‌های قوی‌تری برای سطوح افقی بزرگ:** تغییر ناگهانی سطح مقطع در یک لایه بزرگ مذاب باعث تنش پسماند زیاد و به احتمال زیاد ایجاد ترک در قطعه می‌شود.



پرینت قطعه تحت زاویه ۴۵ درجه (بدون عیب ترک).
زمان پرینت سه قطعه ۵۴ ساعت

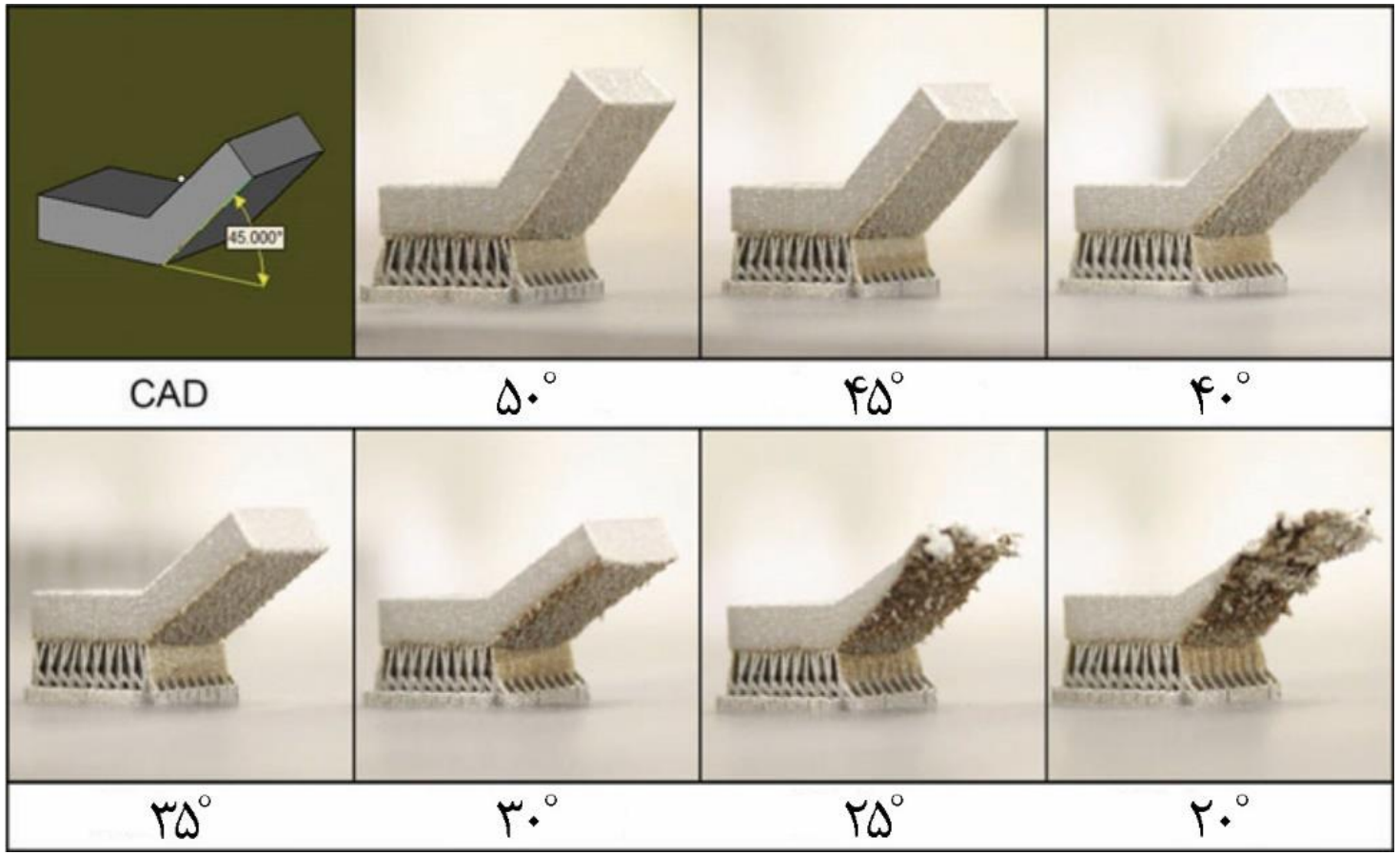


پرینت قطعه در جهت افقی (کمترین ارتفاع و کمترین زمان پرینت).
زمان پرینت سه قطعه ۲۲ ساعت

طراحی برای ساخت افزایشی فلزات: برآمدگی‌ها و تکیه‌گاه‌ها

- ✓ بر اساس تجربه، زوایای بیشتر از ۴۵ درجه نسبت به قائم نیاز به نگهدارنده دارند.
- ✓ استفاده از زوایای بزرگ‌تر، باعث بهبود کیفیت سطح قطعه می‌شود.
- ✓ سطوح "رو به پایین" همیشه کیفیت سطح کمتری نسبت به سطوح "رو به بالا" دارند.
- ✓ هرچه زاویه سطح "رو به پایین" کمتر باشد (به راستای افقی نزدیکتر باشد)، پرداخت سطح کمتری خواهد داشت.

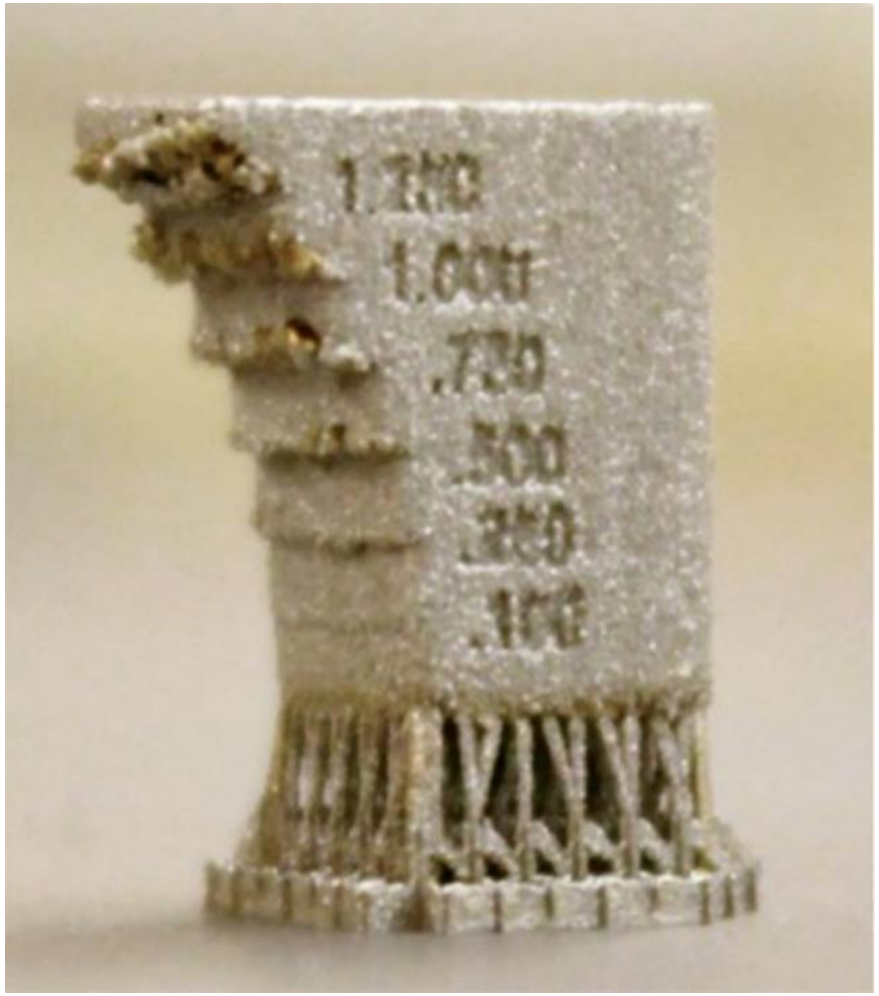
پرینت بدون استفاده از تکیه گاه



طراحی برای ساخت افزایشی فلزات: برآمدگی‌ها و تکیه‌گاه‌ها

- ✓ برای جلوگیری از آسیب به قطعه در محل برآمدگی بزرگ‌تر از **۰/۵ میلی‌متر**، نیاز به استفاده از نگهدارنده وجود دارد.
- ✓ با افزایش اندازه برآمدگی‌ها به بیش از ۰/۵ میلی‌متر، **کیفیت سطح** غیر قابل قبول شده و یا **خم شدن قطعه** به سمت بالا رخ می‌دهد. این اتفاق موجب اخلال در مکانیزم پخش پودر شود.

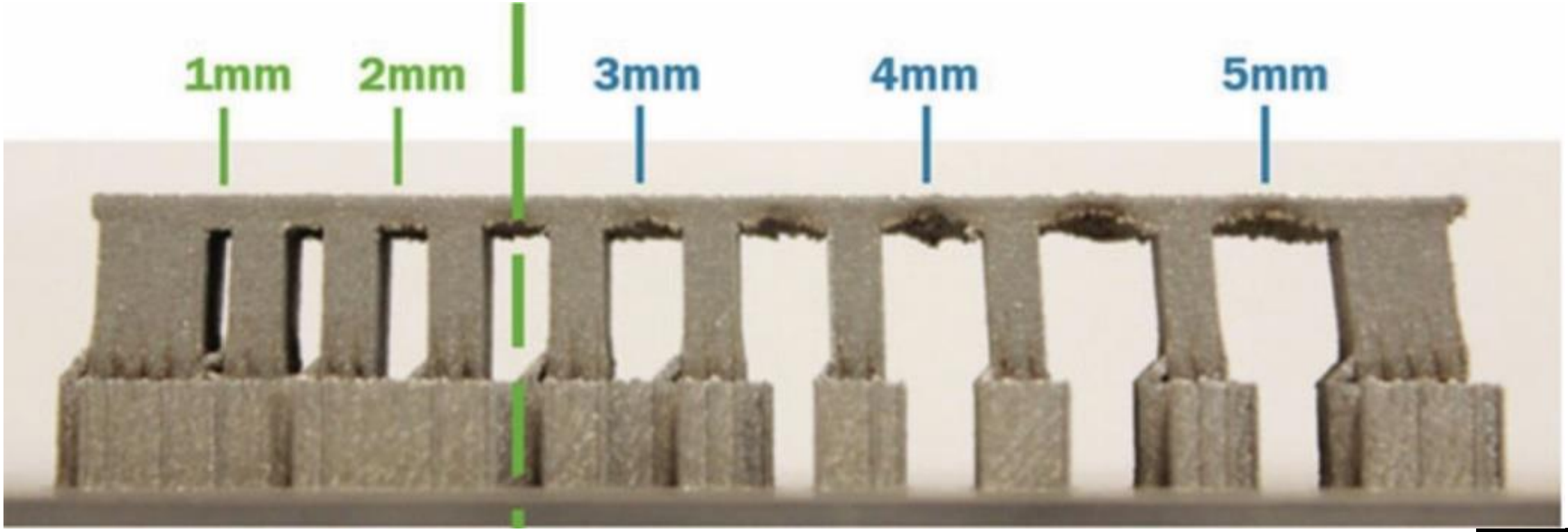
پرینت بدون استفاده از تکیه گاه



طراحی برای ساخت افزایشی فلزات: برآمدگی‌ها و تکیه‌گاه‌ها

- ✓ هر سطح صاف و رو به پایینی که توسط ۲ یا چند دیواره نگهداری شود، پل نام دارد.
- ✓ حداقل دهانه پل بدون نیاز به استفاده از نگهدارنده در فرآیند همجوشی بستر پودری حدود ۲ میلی‌متر است.

پرینت بدون استفاده از تکیه گاه

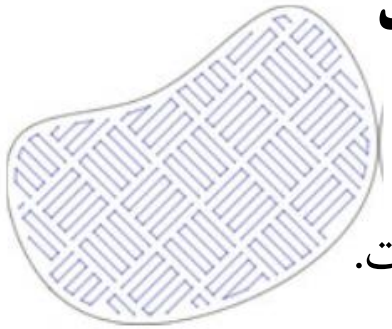


طراحی برای ساخت افزایشی فلزات: تنش پسماند

- ✓ تنش پسماند در بعضی موارد می‌تواند آنقدر زیاد باشد که باعث خم شدن کل صفحه ساخت، جدا شدن قطعه از صفحه ساخت و یا حتی ترک خوردن قطعه شود.
- ✓ ایجاد تنش پسماند یکی از دلایلی است که اغلب قطعات فلزی، نیاز به نگهدارنده دارد.
- ✓ قبل از اینکه قطعات از صفحه ساخت جدا شوند، تمرکز تنش و تنش پسماند باید از طریق عملیات حرارتی از بین بروند.

جدا شدن از صفحه ساخت و یا ترک خوردن قطعه ناشی از تنش پسماند

طراحی برای ساخت افزایشی فلزات: تنش پسماند



الگوی هاشور شطرنجی

سرعت ساخت پایین

تنش پسماند کم

مناسب برای قطعات بزرگ

الگوی هاشور مارپیچی

سرعت ساخت بالا

تنش‌های پسماند بالاتر

مناسب برای قطعات کوچک و نازک

- ✓ بهترین راه برای اجتناب از تنش پسماند حذف آن از طریق طراحی مناسب است.
- ✓ روش‌های طراحی نسبتاً ساده برای کمینه کردن تنش پسماند:
  - جلوگیری از تغییرات بزرگ در سطح مقطع (مثلا با تغییر زاویه چاپ)
  - پیش‌گرم کردن صفحه ساخت
  - گرم کردن محفظه ساخت
- اگر امکان حذف حجم زیاد ماده به صورت کامل میسر نباشد، پارامترهای هاشور لیزر تغییر داده شود.
  - به عنوان مثال، الگوهای هاشور شطرنجی کوچک نسبت به الگوهای هاشور بزرگ‌تر یا مناطق اسکن بزرگ، تنش پسماند کمتری ایجاد می‌کنند اگرچه روند ساخت را کمی کند می‌کنند.

طراحی برای ساخت افزایشی فلزات: تمرکز تنش

- ✓ روش‌های ساده برای کاهش تمرکز تنش:
  - گرد کردن گوشه‌های تیز
  - استفاده از ضخامت یکنواخت برای دیواره‌ها
  - جلوگیری از ایجاد حجم زیاد ماده

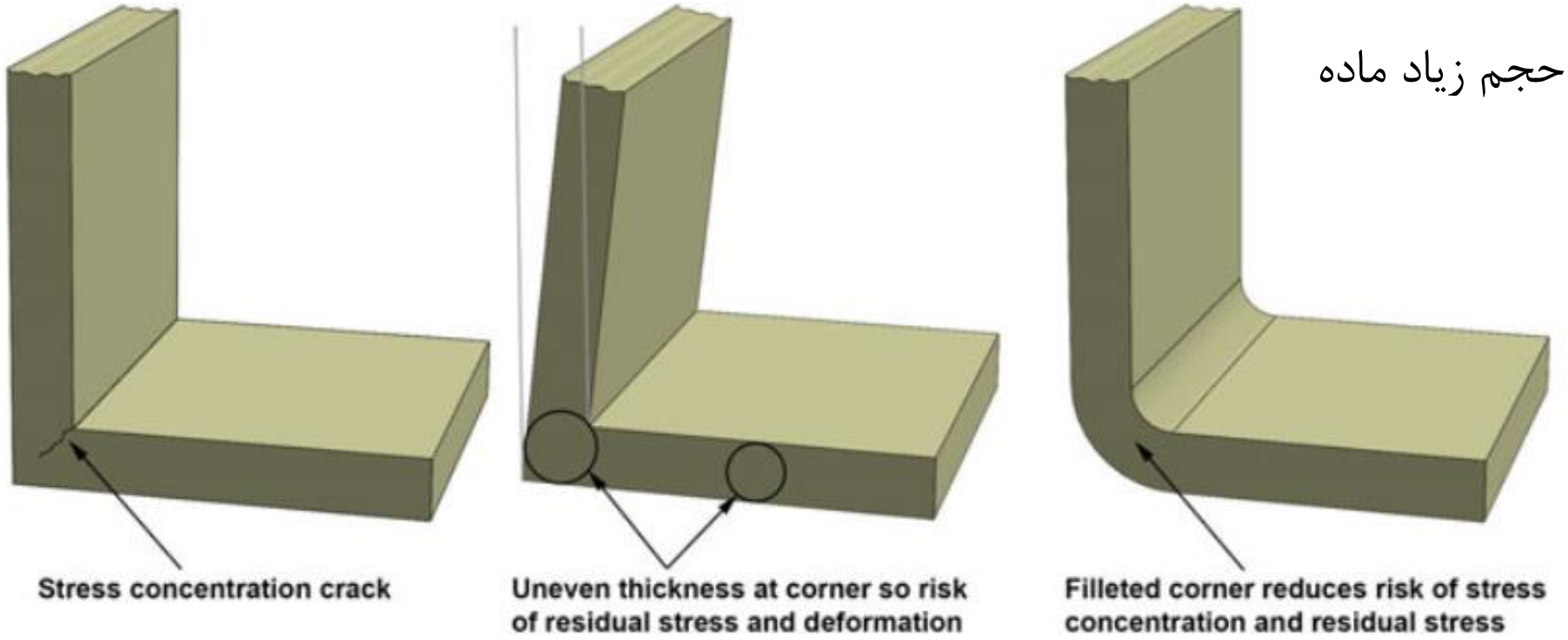


Fig. 9.36 Example of simple filleting to eliminate both stress concentrations and residual stress

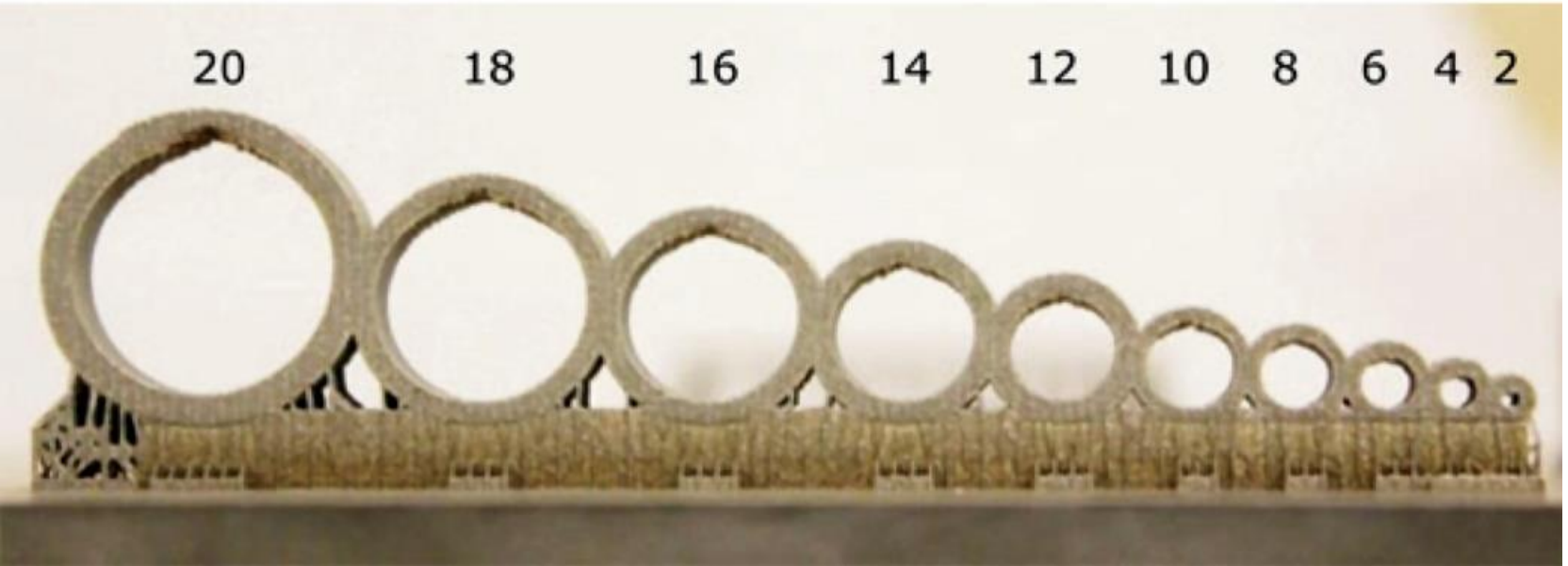
طراحی برای ساخت افزایشی فلزات: تمرکز تنش

- ✓ روش‌های ساده برای کاهش تمرکز تنش:
  - گرد کردن گوشه‌های تیز
  - استفاده از ضخامت یکنواخت برای دیواره‌ها
  - جلوگیری از ایجاد حجم زیاد ماده

Fig. 9.34 Printed parts still attached to build platform with supports, and parts after post-processing and shot-peening

طراحی برای ساخت افزایشی فلزات: سوراخ‌های افقی

- ✓ در AM فلزی، سوراخ‌های افقی (یا با زاویه کمتر از حداقل زاویه مجاز) با قطر بزرگتر از یک حد مشخص، به نگهدارنده نیاز دارند.
- ✓ جدا کردن نگهدارنده از داخل سوراخ‌ها همیشه دشوارتر از جدا کردن آن از نواحی خارجی قطعه است.
- ✓ به عنوان یک دستورالعمل کلی، **سوراخ‌هایی با قطر کمتر از ۸ میلی‌متر** را می‌توان بدون نگهدارنده پرینت کرد.
- ✓ در صورت نیاز به سوراخ‌های بزرگتر، متداول‌ترین راهکار برای پرینت بدون نگهدارنده، تغییر شکل مقطع سوراخ است (بیضی، قطره اشک و لوزی).



طراحی برای ساخت افزایشی فلزات: سوراخ‌های افقی

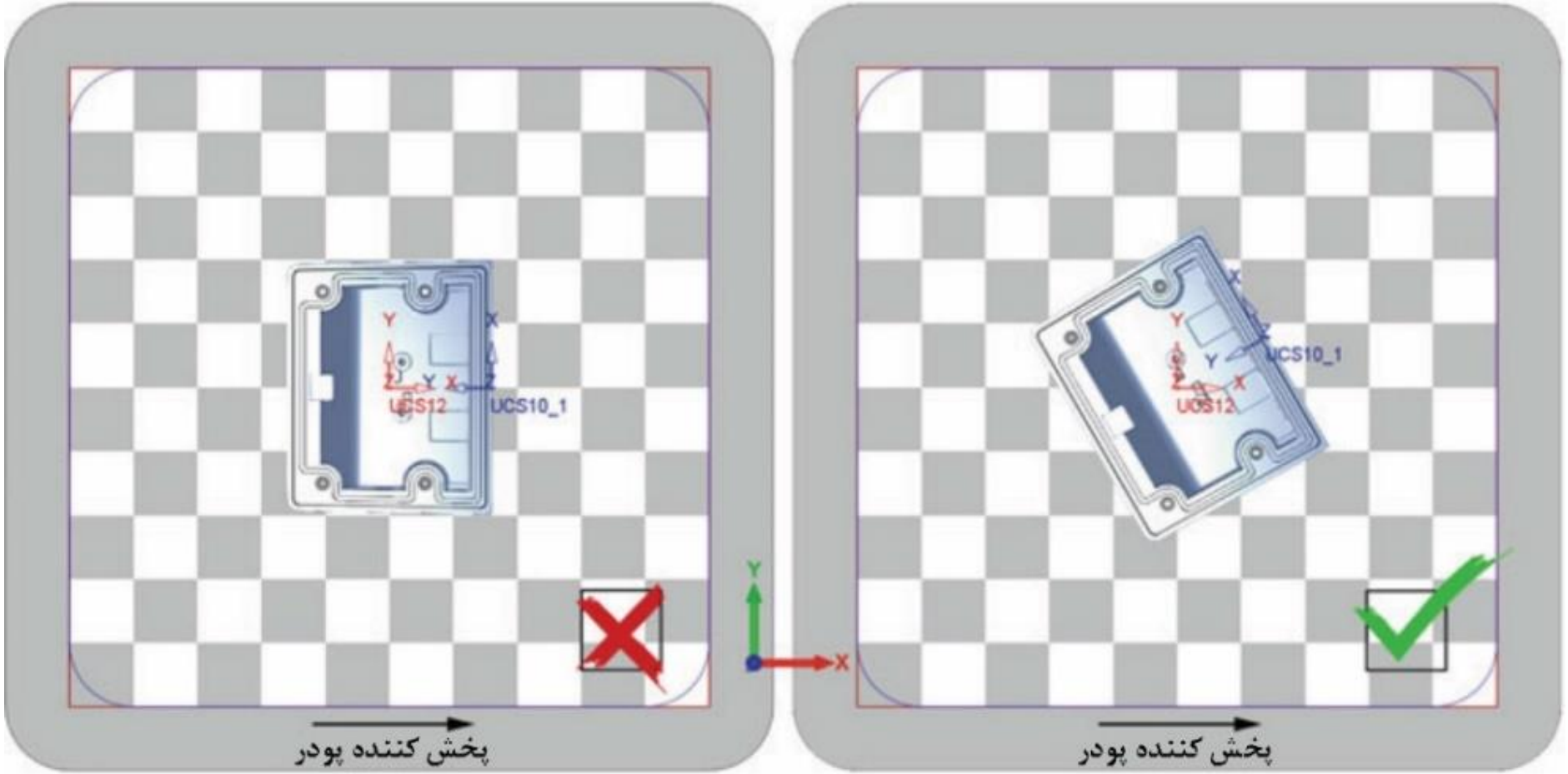
- ✓ سوراخ‌های افقی قابل پرینت بدون نگهدارنده

سوراخ به شکل لوزی که می‌توان آن را تقریباً به هر اندازه‌ای پرینت نمود. برای جلوگیری از تمرکز تنش بهتر است گوشه‌ها را گرد کرد.	سوراخ به شکل قطره اشک که می‌توان آن را تقریباً به هر قطری پرینت نمود به شرطی که زاویه بالا از مقدار کمینه که نیاز به نگهدارنده دارد، کمتر نباشد. برای جلوگیری از تمرکز تنش بهتر است قسمت بالای قطره اشک گرد شود.	سوراخ بیضی شکل، هنگامی که ارتفاع بیضی دو برابر عرض آن باشد، بسته به سیستم مورد استفاده، تا ارتفاع حدود ۲۵ میلی‌متر امکان پرینت دارد.	سوراخ‌های دایره‌ای تا قطر ۸ میلی‌متر را می‌توان بدون استفاده از نگهدارنده ساخت. سوراخ‌های بزرگتر به نگهدارنده نیاز دارند. باید توجه داشت که این قطر بر اساس دستگاه و مواد استفاده شده متفاوت است.

طراحی برای ساخت افزایشی فلزات: چینش قطعات

- ✓ در قطعات مستطیل‌شکل با دیواره‌های مسطح بلند، قطعه طوری قرار گیرد که دیواره‌ها، موازی با پخش‌کننده پودر نباشند (دوران ۵ تا ۴۵ درجه حول محور Z).

اجتناب از پرینت قطعات به صورت موازی با تیغه پخش‌کننده

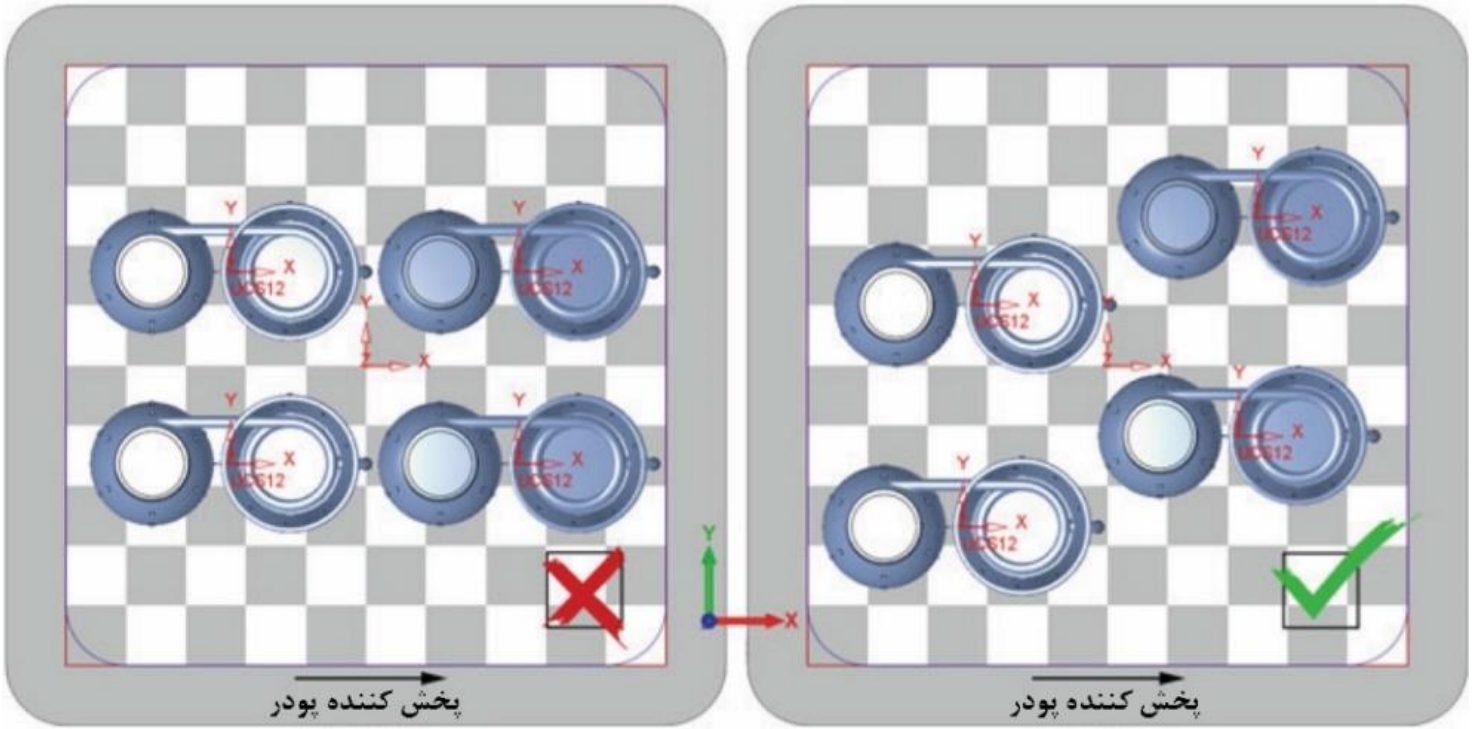


طراحی برای ساخت افزایشی فلزات: چینش قطعات

✓ بهتر است از قرار دادن قطعات به صورت پشت سر هم اجتناب شود.

نمونه‌ای از پرینت معیوب قطعه، به دلیل نقص تیغه پخش‌کننده پودر

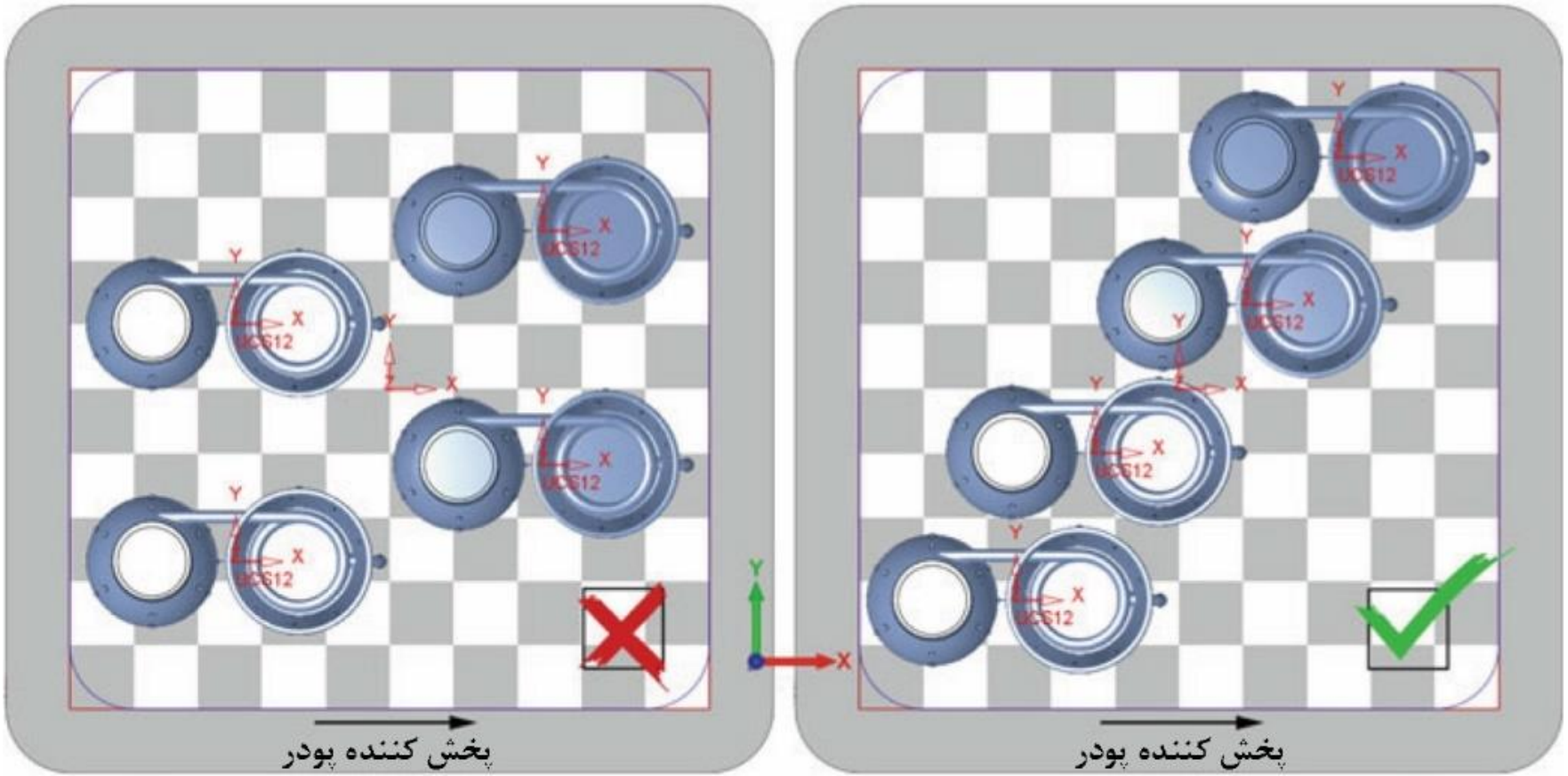
اجتناب از چینش قطعات پشت سر یکدیگر



طراحی برای ساخت افزایشی فلزات: چینش قطعات

- ✓ بهتر است از تماس همزمان پخش‌کننده با چند قطعه جلوگیری شود.

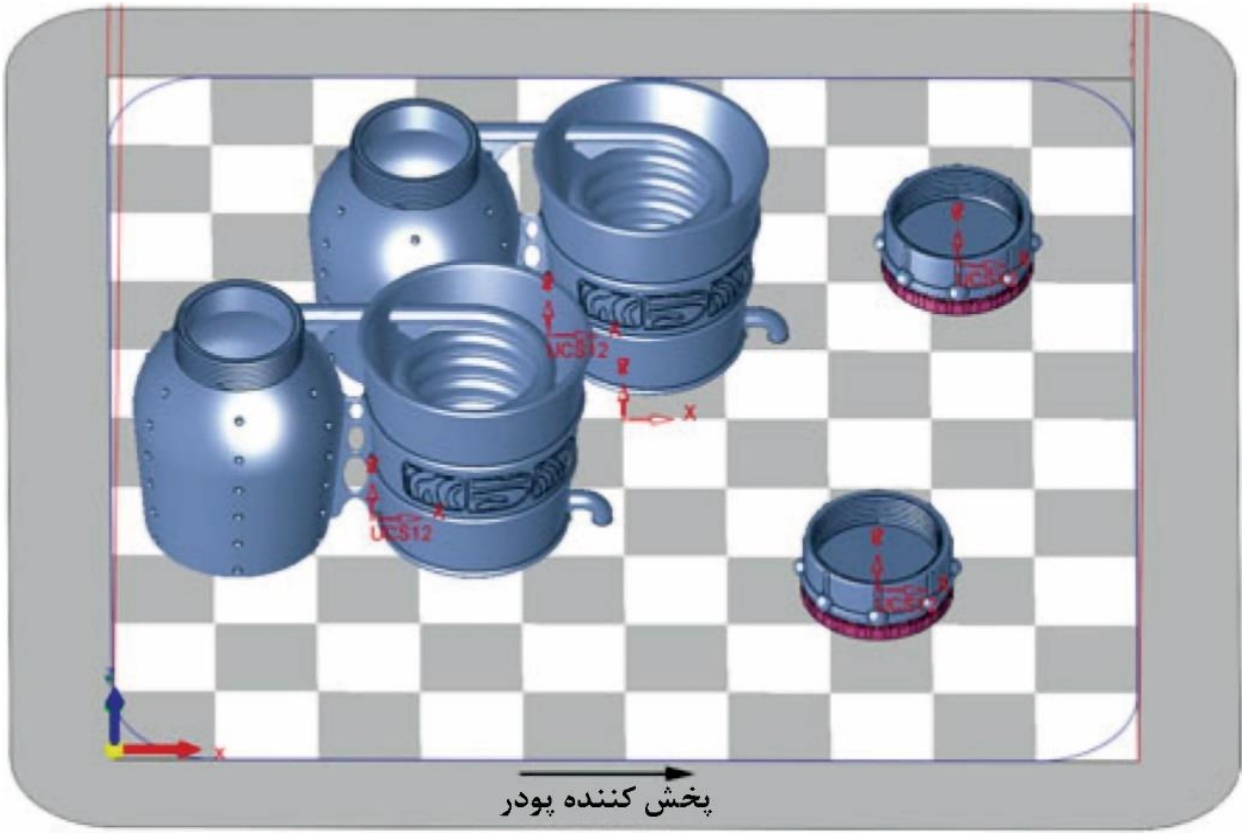
جلوگیری از برخورد همزمان قطعات با پخش‌کننده



طراحی برای ساخت افزایشی فلزات: چینش قطعات

- ✓ بالاترین نواحی (بلندترین قطعات)، باید نزدیک به پخش‌کننده قرار گیرند.
- ✓ در صورت عدم وجود پودر کافی، در لایه‌های آخر می‌توان مقدار پودر کمتری نسبت به لایه‌های اول استفاده نمود.

بلندترین قطعات نزدیک به مخزن پودر



طراحی برای ساخت افزایشی:

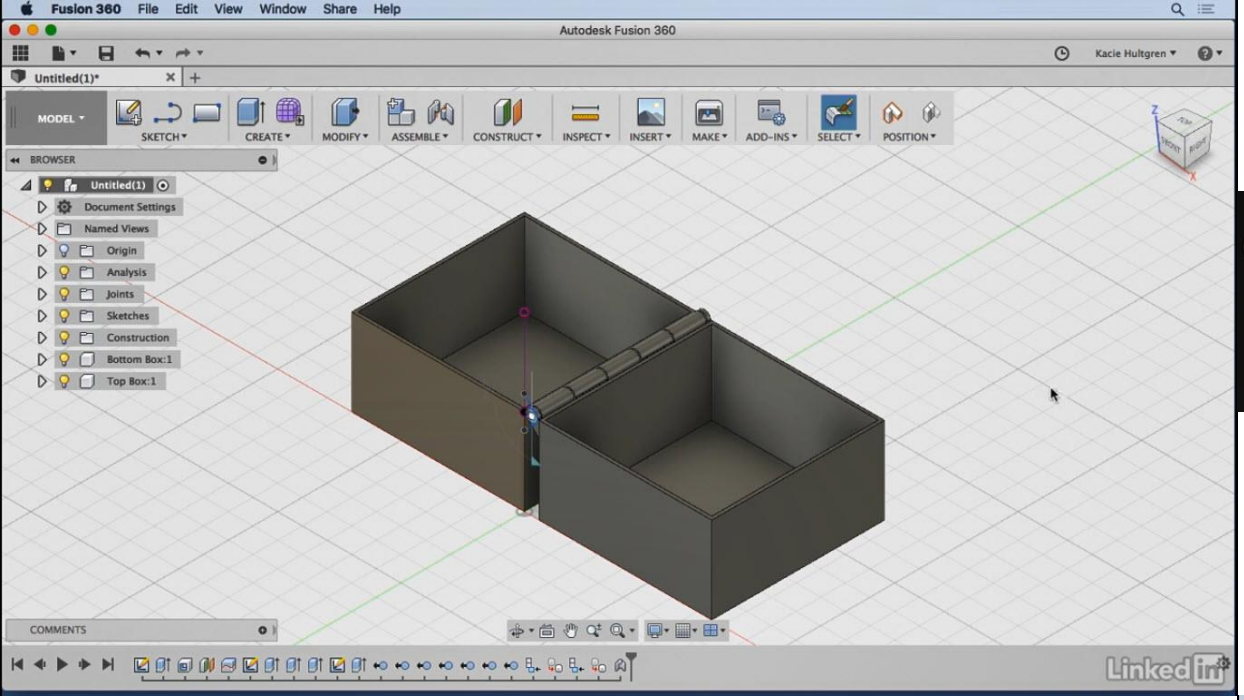
فرآیند مدل‌سازی رسوب ذوبی

(FDM)

New Set of Rules

Optimize products for manufacturing.

- Reduce print time and material use
- Add strength and flexibility
- Understand thresholds and tolerances
- Choose best material
- Incorporate color
- Break down a project into manageable pieces

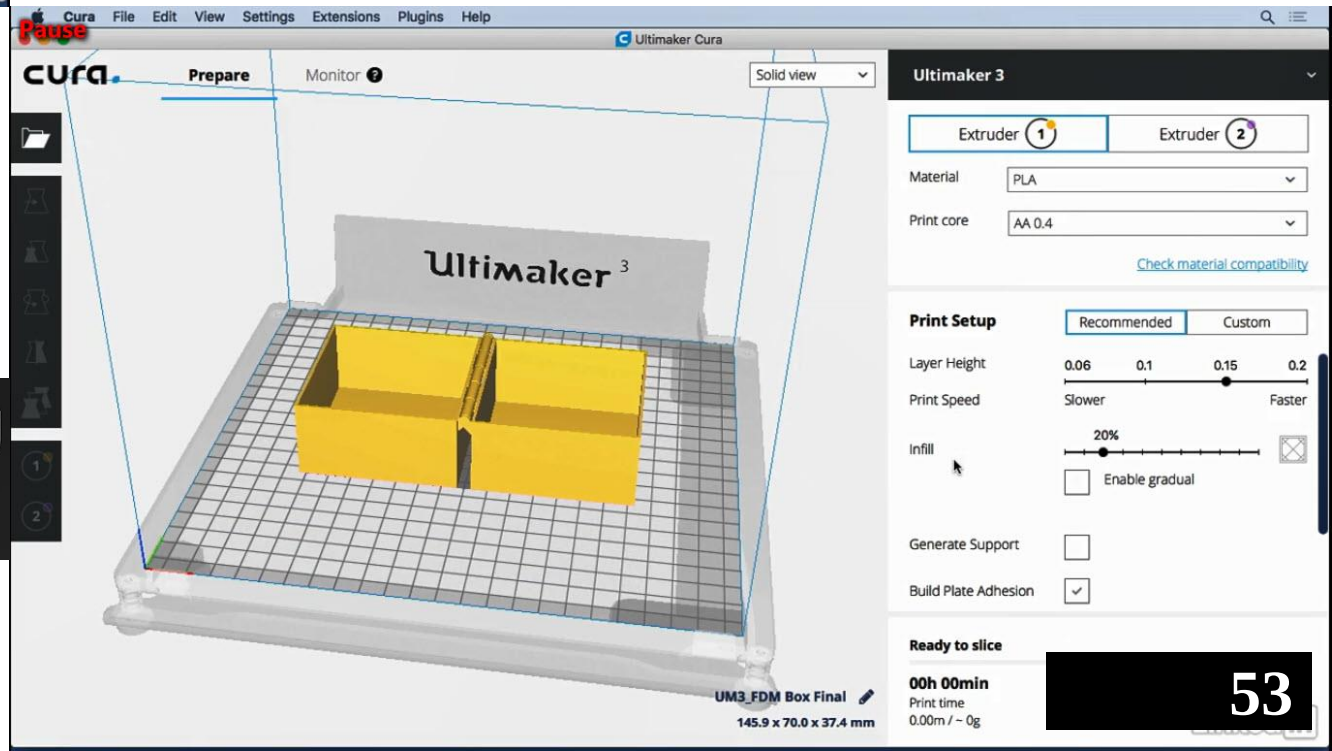


Computer-Aided Design

CAD

Computer-Aided Manufacturing

CAM



CAD vs. CAM

When you understand how to use both, you'll have the most control.

Exploring
Build Plate Surfaces

Heated Plates

- A heating element covered with a metal plate
- Coverings include Kapton Tape, Glass, or specialty surface like PEI

PEI (Polyetherimide)

Exploring
Build Plate Surfaces

Heated Plates

Pros

- Versatile
- Wide variety of thermoplastics

Cons

- Expansion on bottom layers
- Added time for heating and cooling

Exploring
Build Plate Surfaces

Disposable

Pros

- Purpose built
- Optimized for a variety of thermoplastics

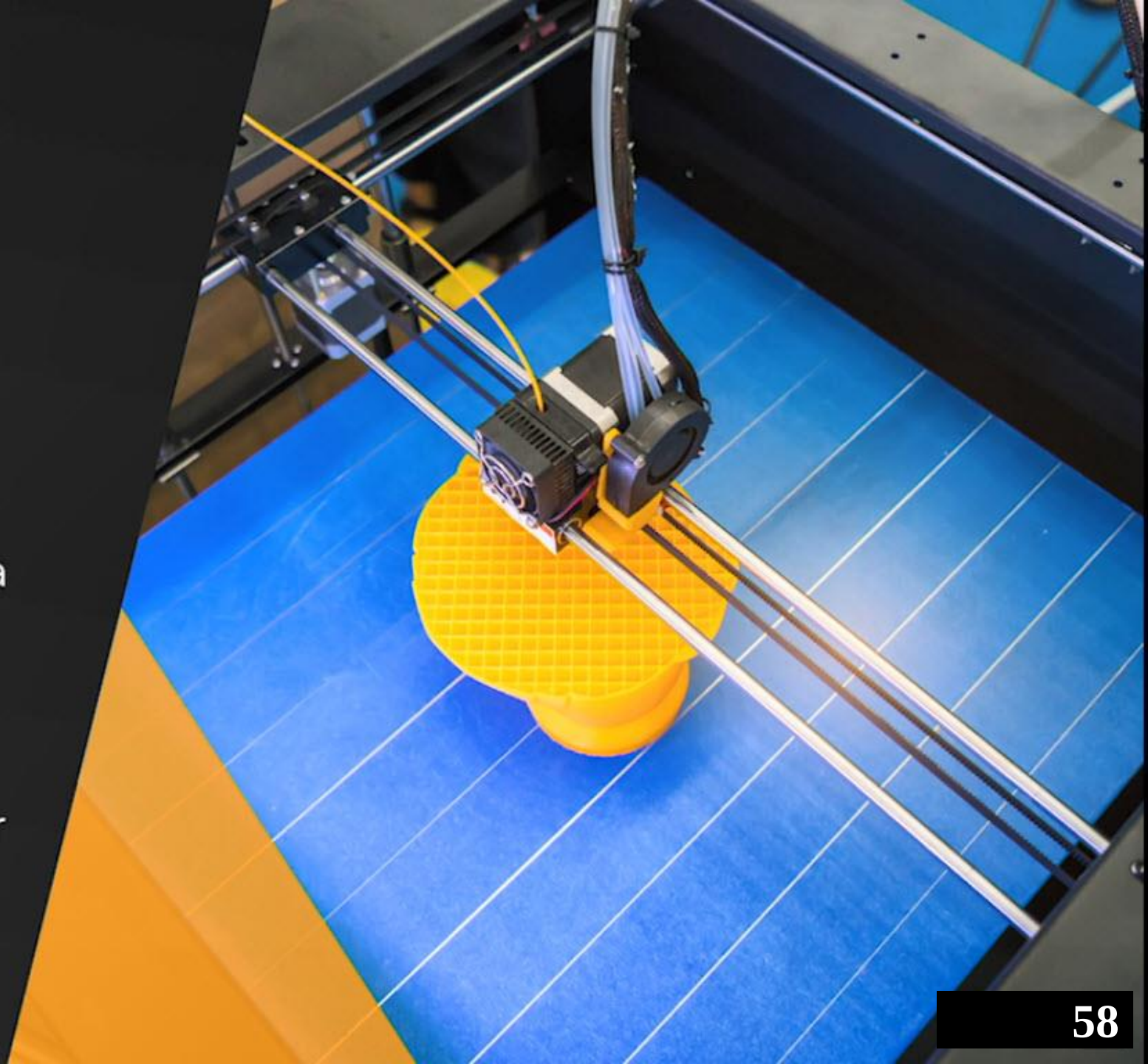
Cons

- Expensive

Exploring
Build Plate Surfaces

Re-useable

- Glass, metal, or plastic
- Common choice for PLA
- Surface treatments include a thin layer of glue stick, or applied blue painters tape
- Specialty surfaces like PEI or flexible plates



Exploring
Build Plate Surfaces

Re-useable

Pros

- Overall machine cost is lower
- Less down time
- No layer expansion

Cons

- Less versatile

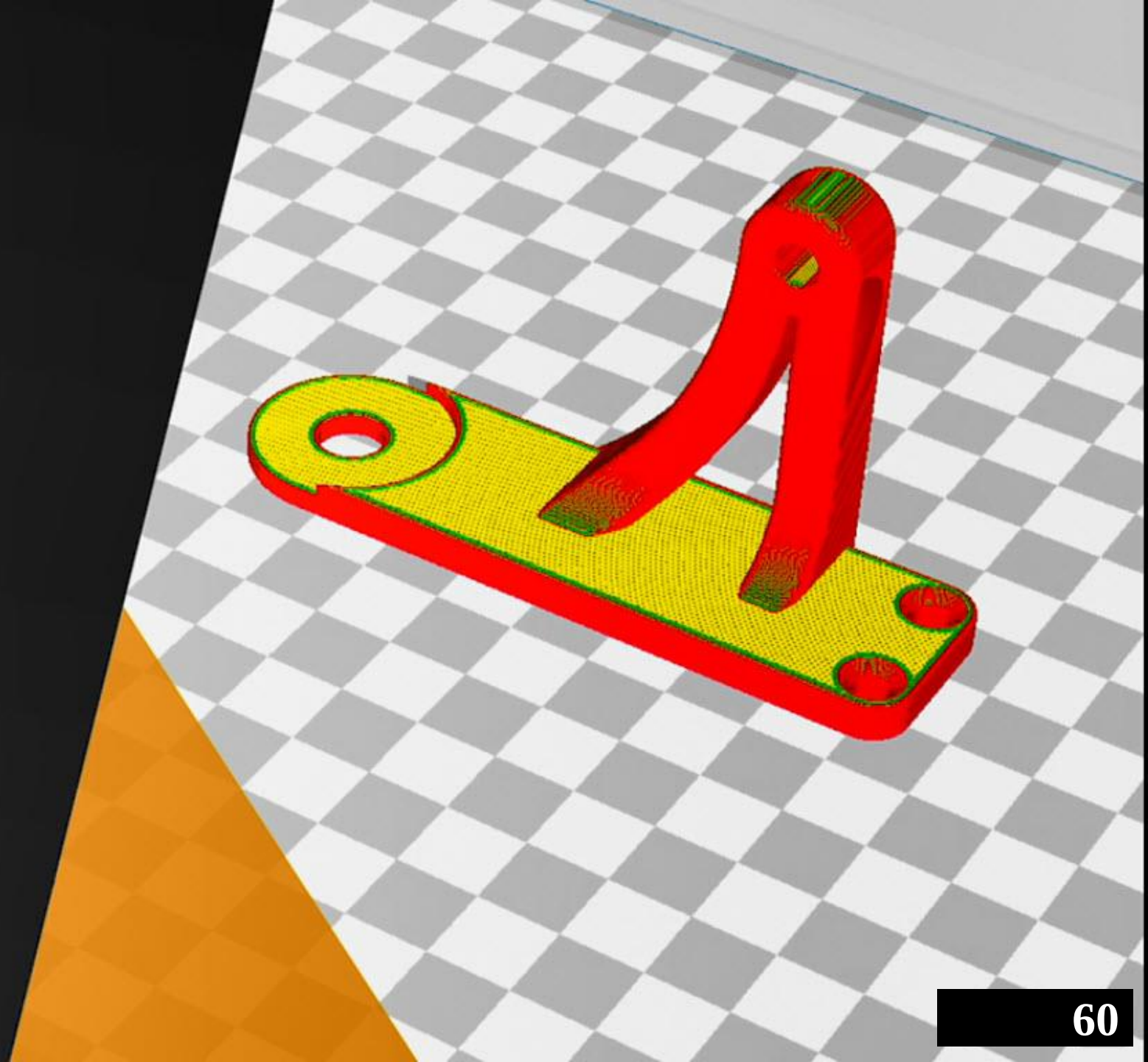
Exploring
Build Plate Adhesion
On Surface

Pros

- Fast and efficient
- No post-processing
- Smooth bottom surface

Cons

- Corner lifting

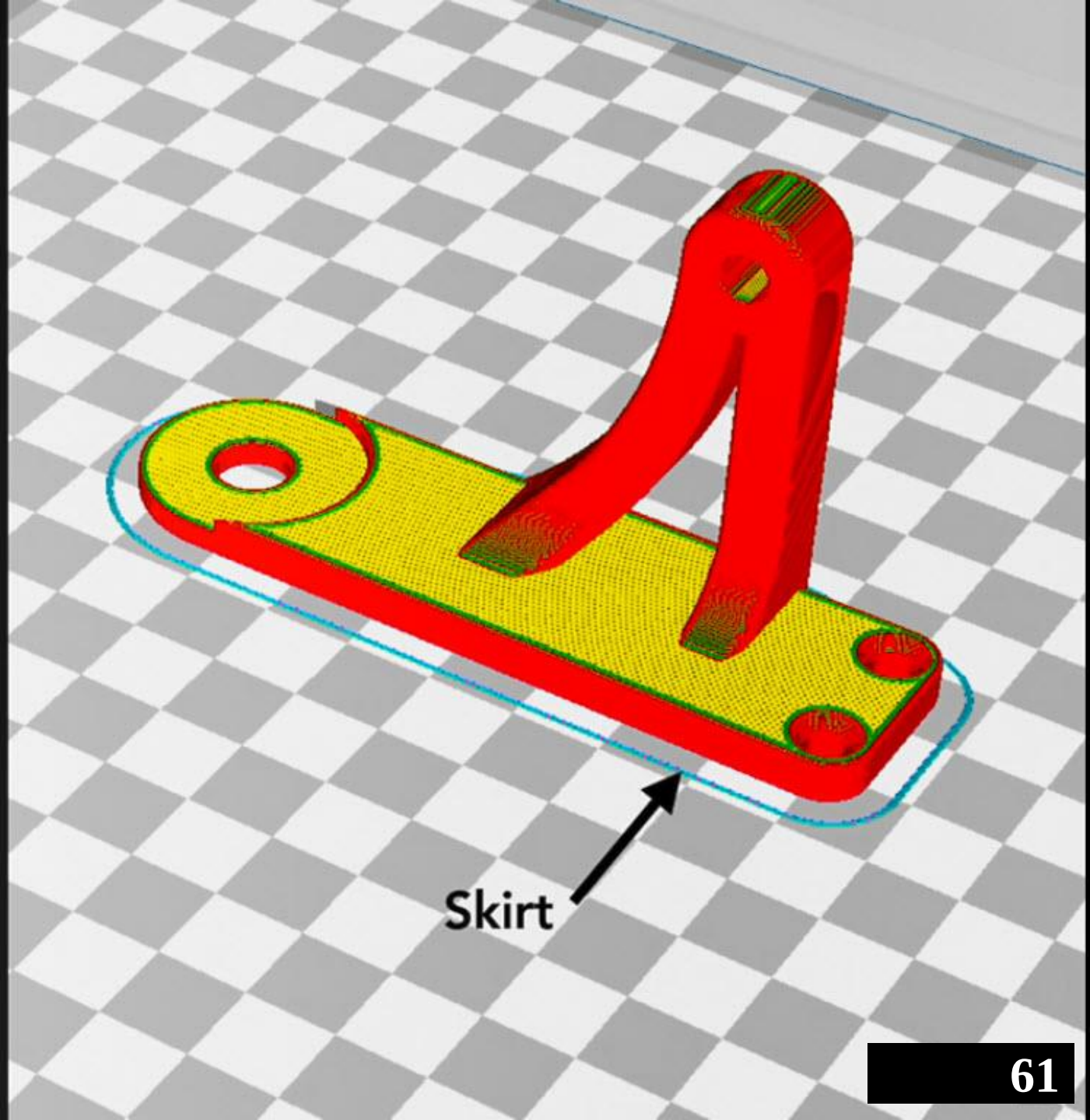


Exploring
Build Plate Adhesion
With Skirt

A single line around your print

Pros

- Assurance that your build surface is level



Exploring
Build Plate Adhesion
With Brim

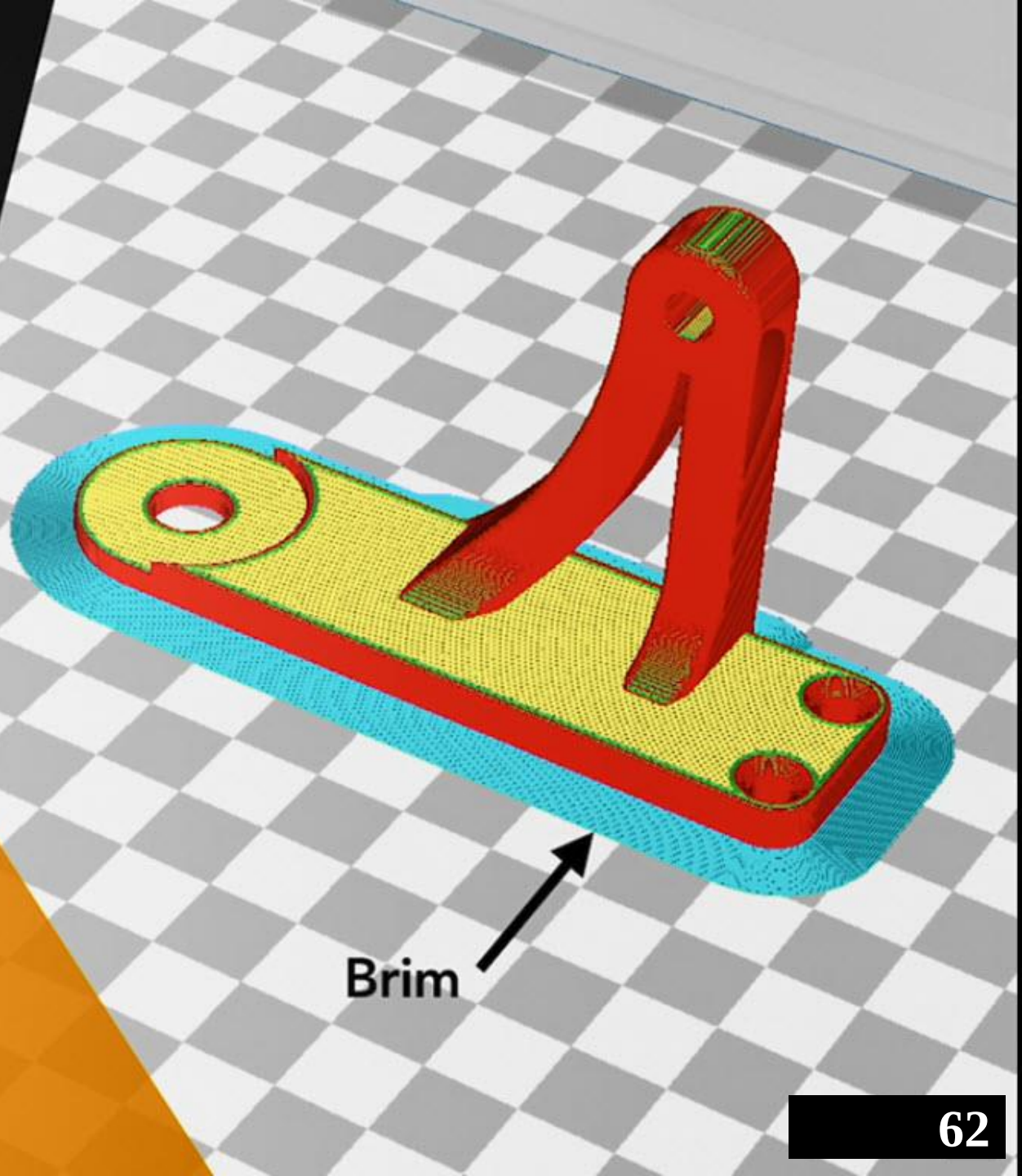
A brim extends the first layer of your print for better adhesion.

Pros

- Less lifting and warping

Cons

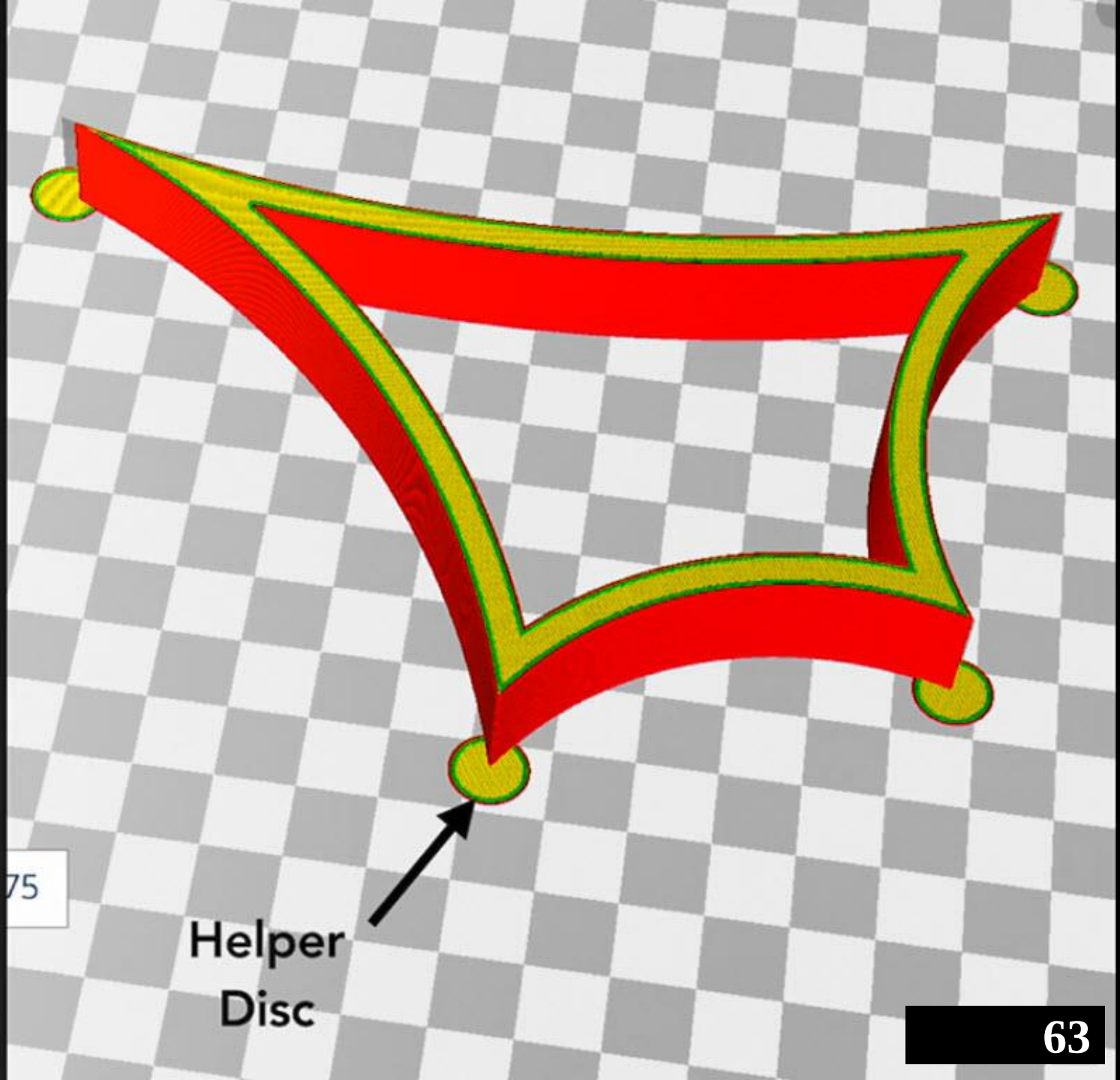
- Requires post-processing



Exploring
Build Plate Adhesion
Custom

Add your own geometry in CAD to serve the same purpose.

"Helper" geometry should be one-layer-height-thick for easy removal.



Exploring

Build Plate Adhesion

With Raft

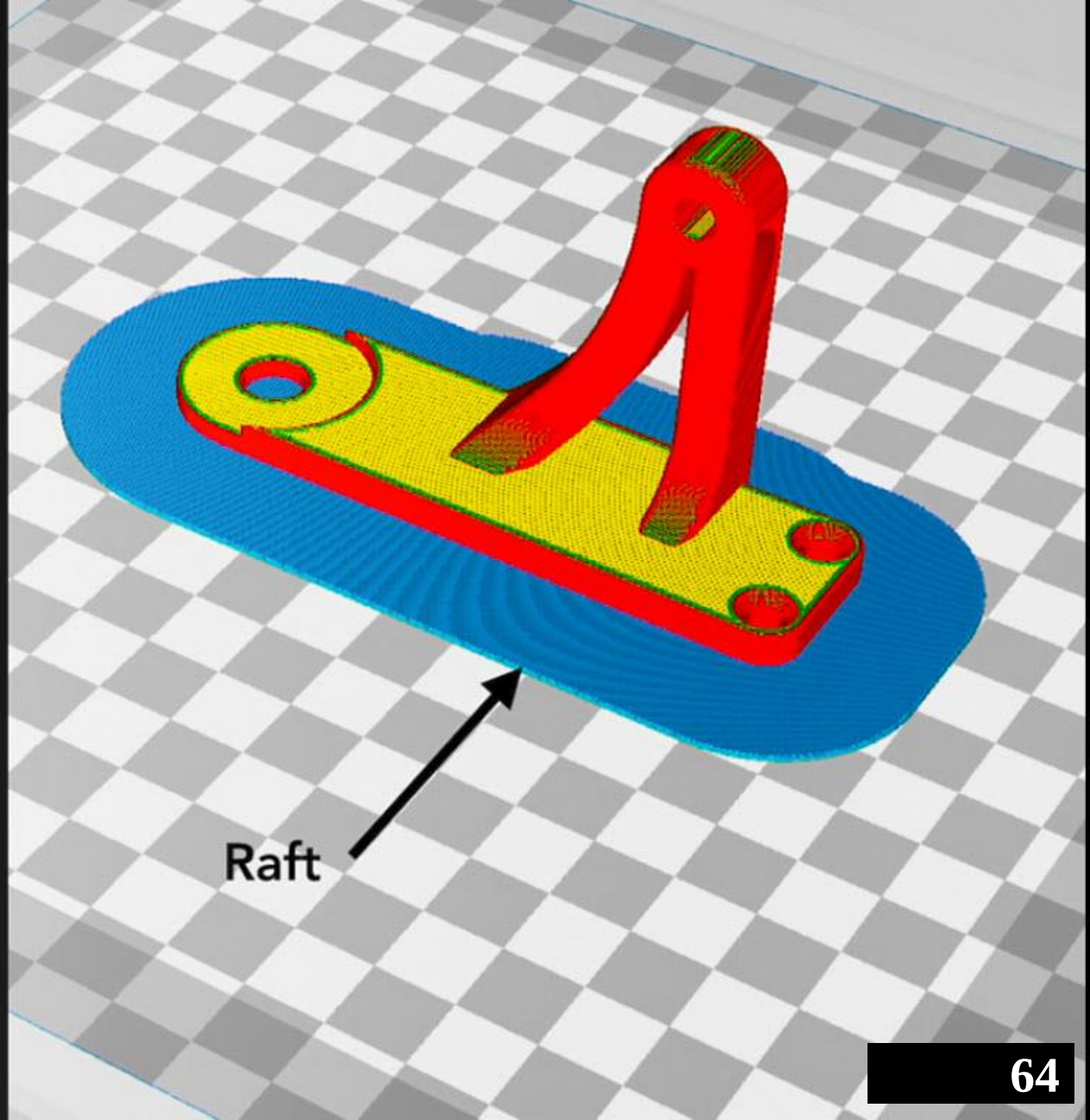
A thick layer of plastic under your print to aid with adhesion

Pros

- Most forgiving option

Cons

- Requires post-processing
- Can mar bottom surface
- Adds time



Exploring
Build Plate Adhesion

Pro Tips

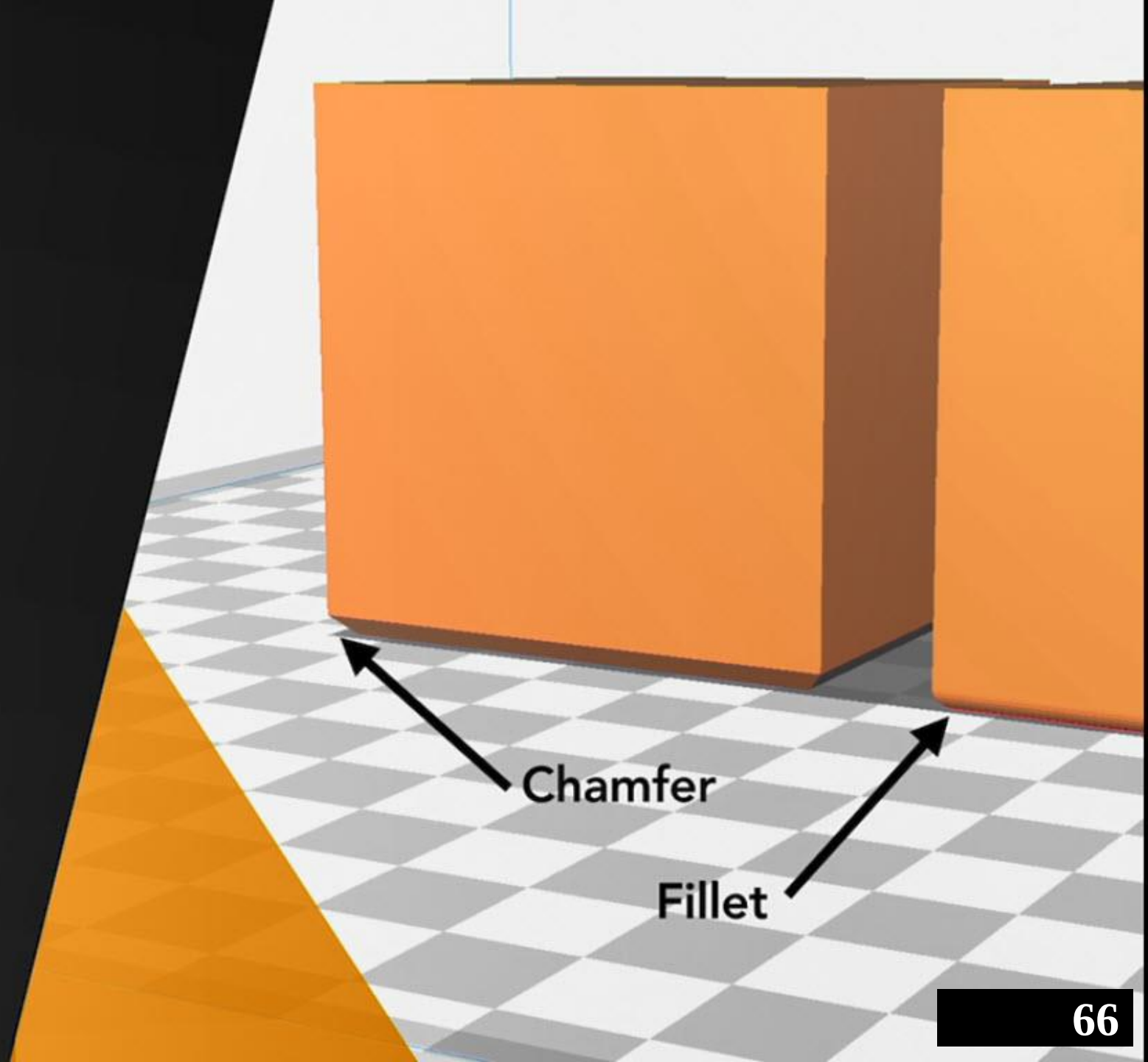
Certain geometries are problematic and benefit from more aggressive adhesion.

- Large prints
- Sharp corners
- Small contact area
- Tall, skinny prints

Exploring
Build Plate Adhesion

Pro Tips

- Edges with chamfers or fillets make a print easier to remove
- This is also a great way to counteract bottom layer expansion due to a heated bed



What if the geometry in your design exceeds 45 degrees, or has large open spans?

Support material

Dissolvable Supports

- Two extruders
- Support material is washed away

Industrial Printers

- ABS, nylon, etc.
- Proprietary dissolvable support material

Desktop Printers

- PLA or nylon, paired with PVA
- Dissolves in water
- ABS paired with HIPS

  High Impact Polystyrene (HIPS)
- Dissolved in limonene

Removable Supports

- One extruder
- Support manually removed by hand

Dissolve support is standard on commercial grade FDM printers.

- Create complex geometries without additional planning
- Recommended for prototyping
- Design with fewer restrictions

Removable support has similar advantages

- Design complex geometry
- Support needs to be removed manually
- Time-consuming and can mar the surface
- Make sure support areas are easy to access for cleaning
- Avoid delicate or interlocking parts

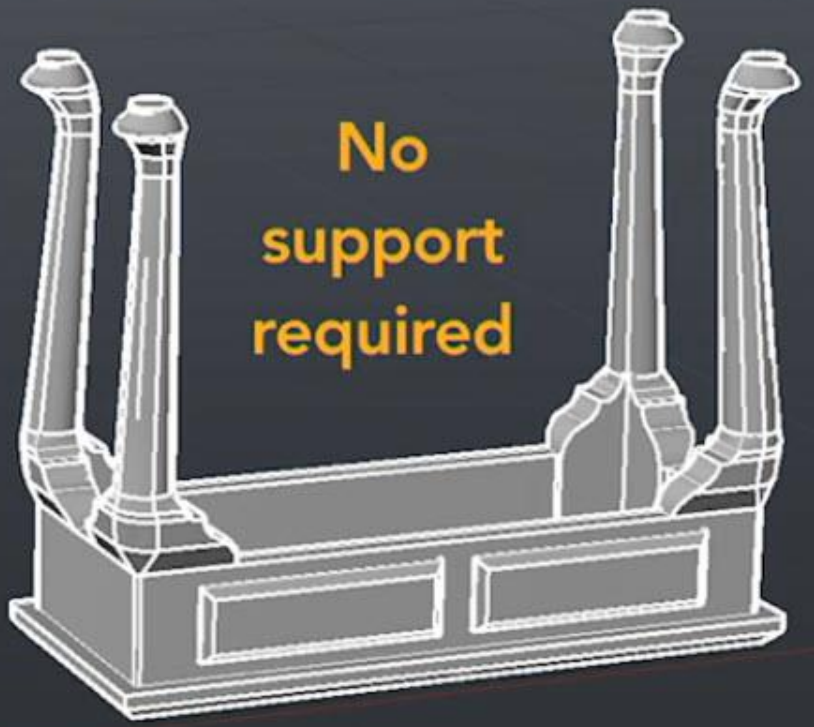
Both types of support are generated by your slicer.

Consider Supportless Designs

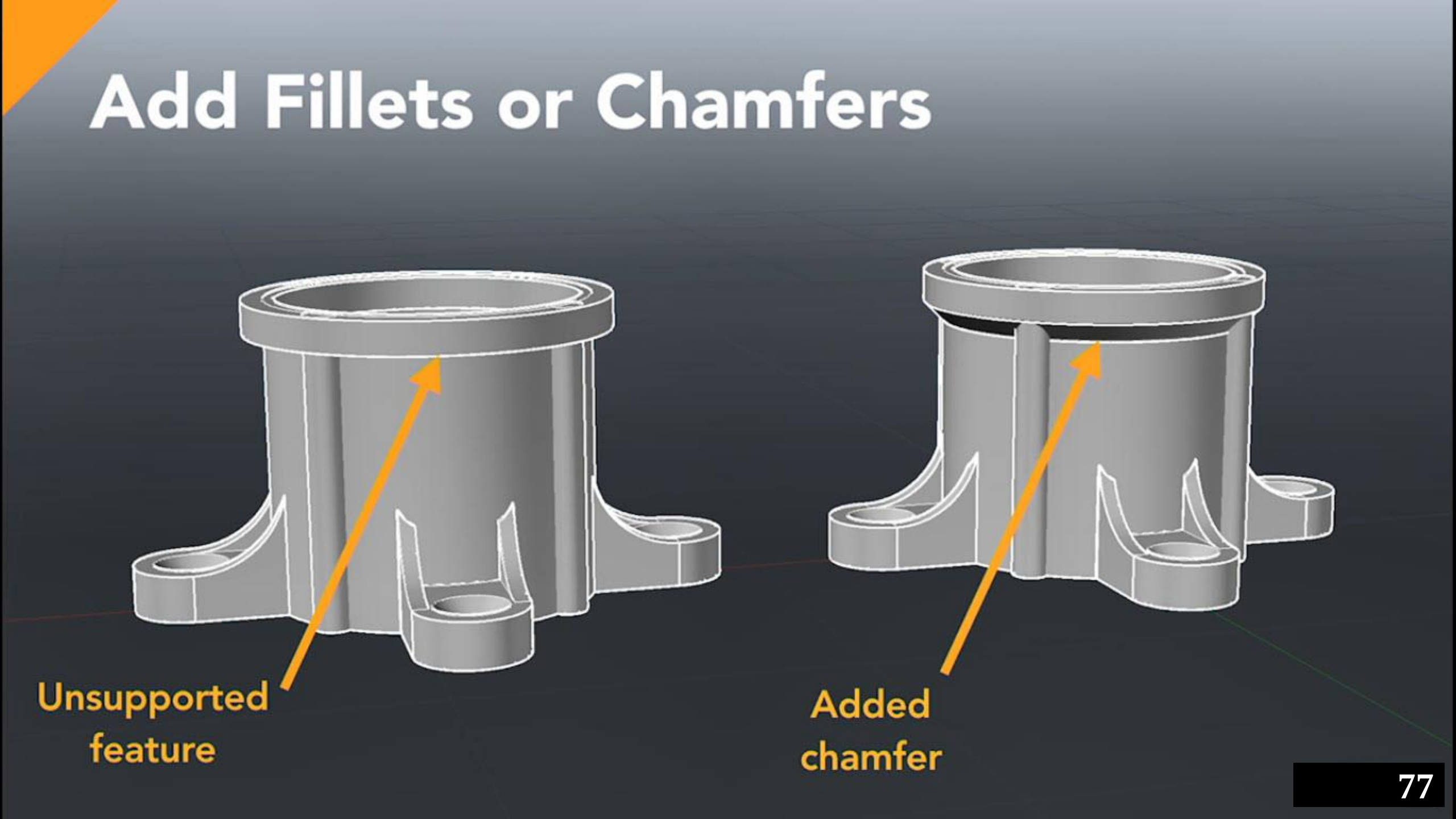
- Save printing and post-processing time
- Use less material
- Cost-effective

Creating
Supportless Designs

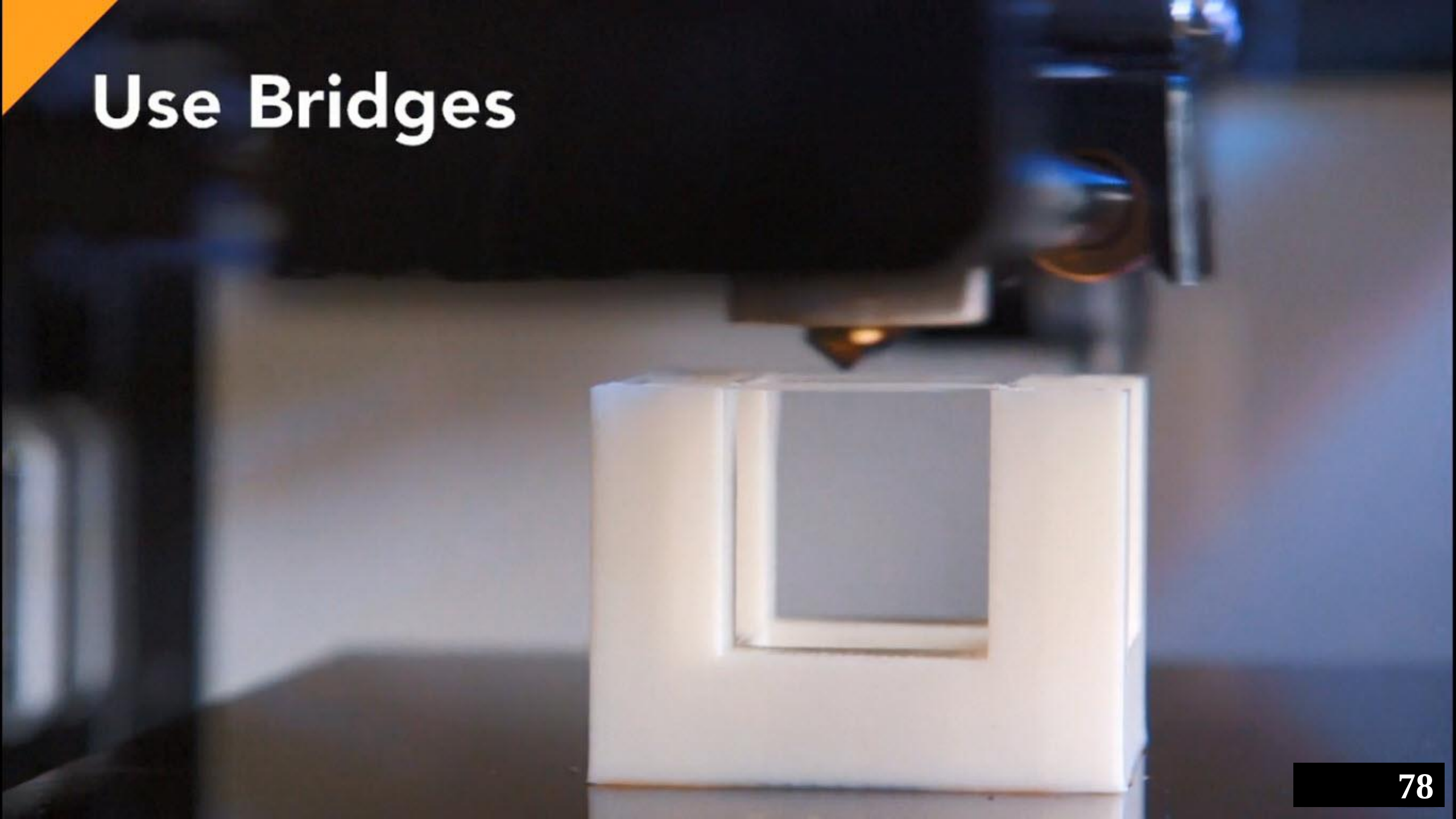
Orientation



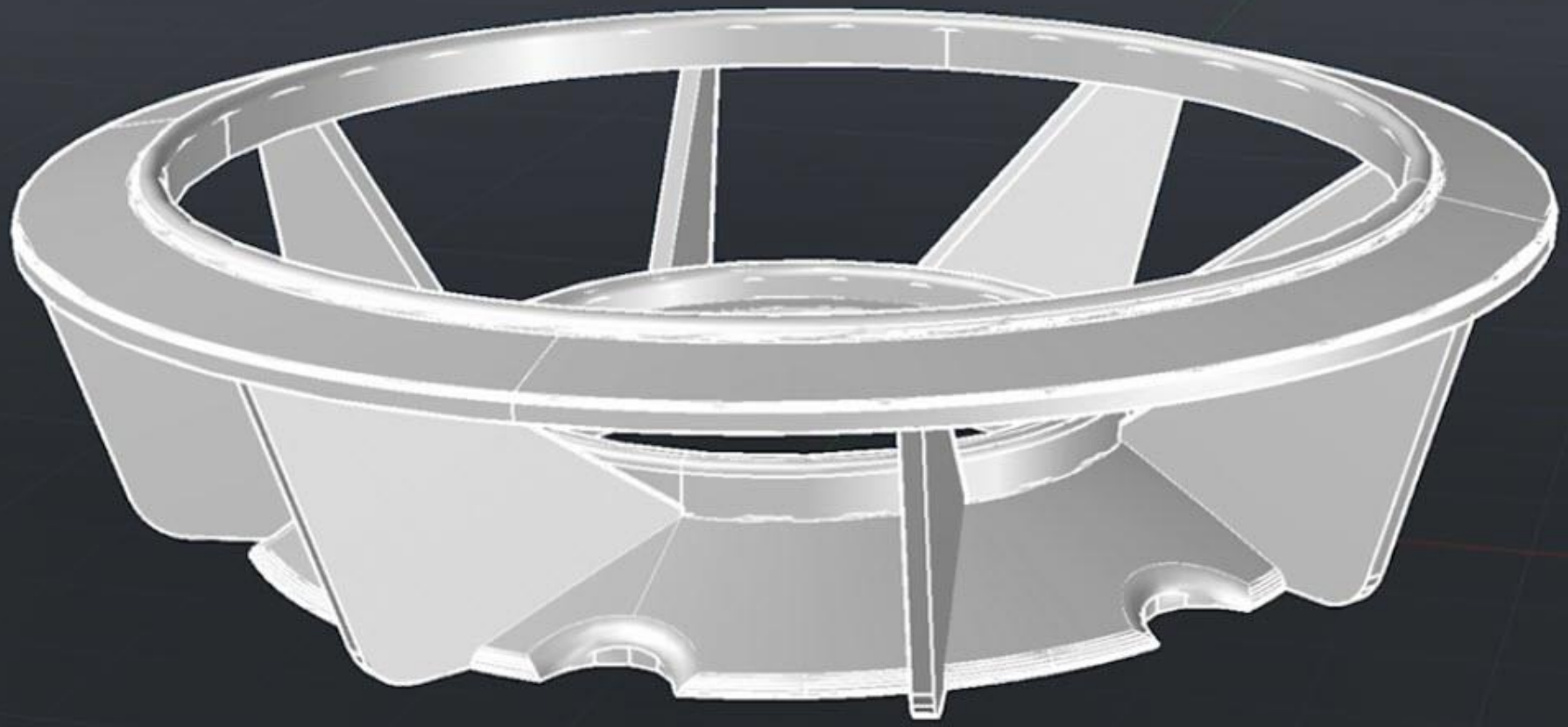
Add Fillets or Chamfers



Use Bridges

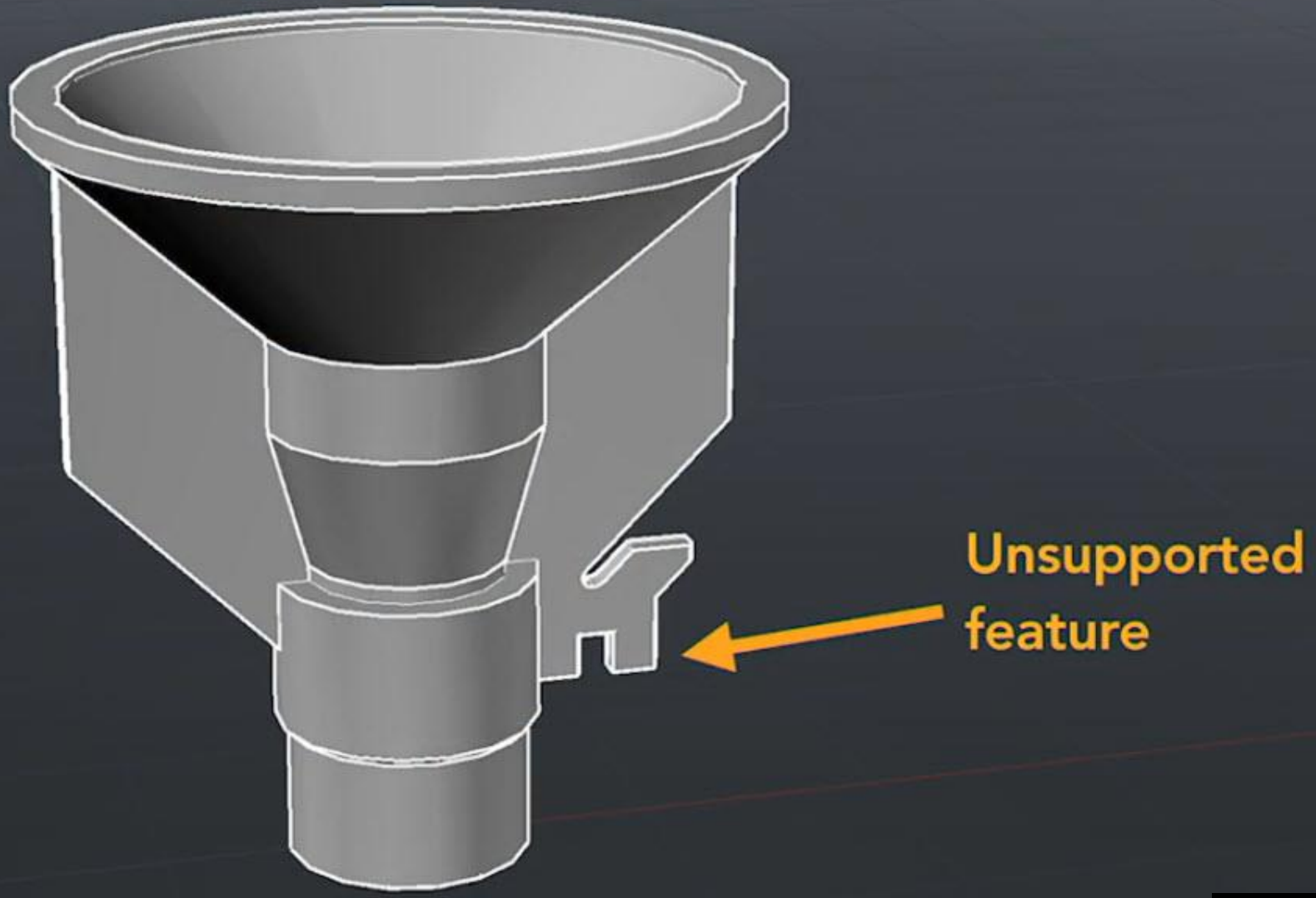


Cut It Up

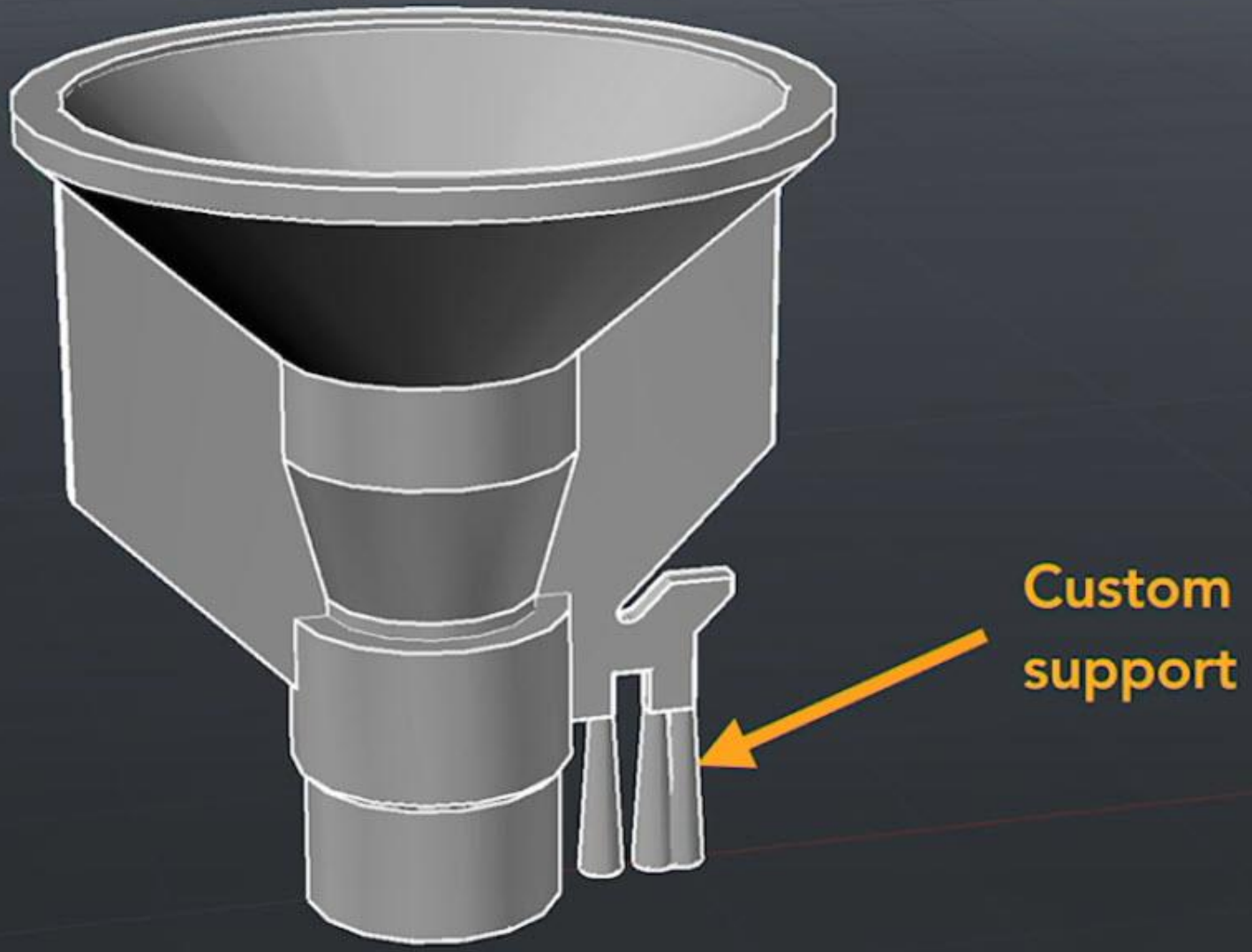


Cut It Up

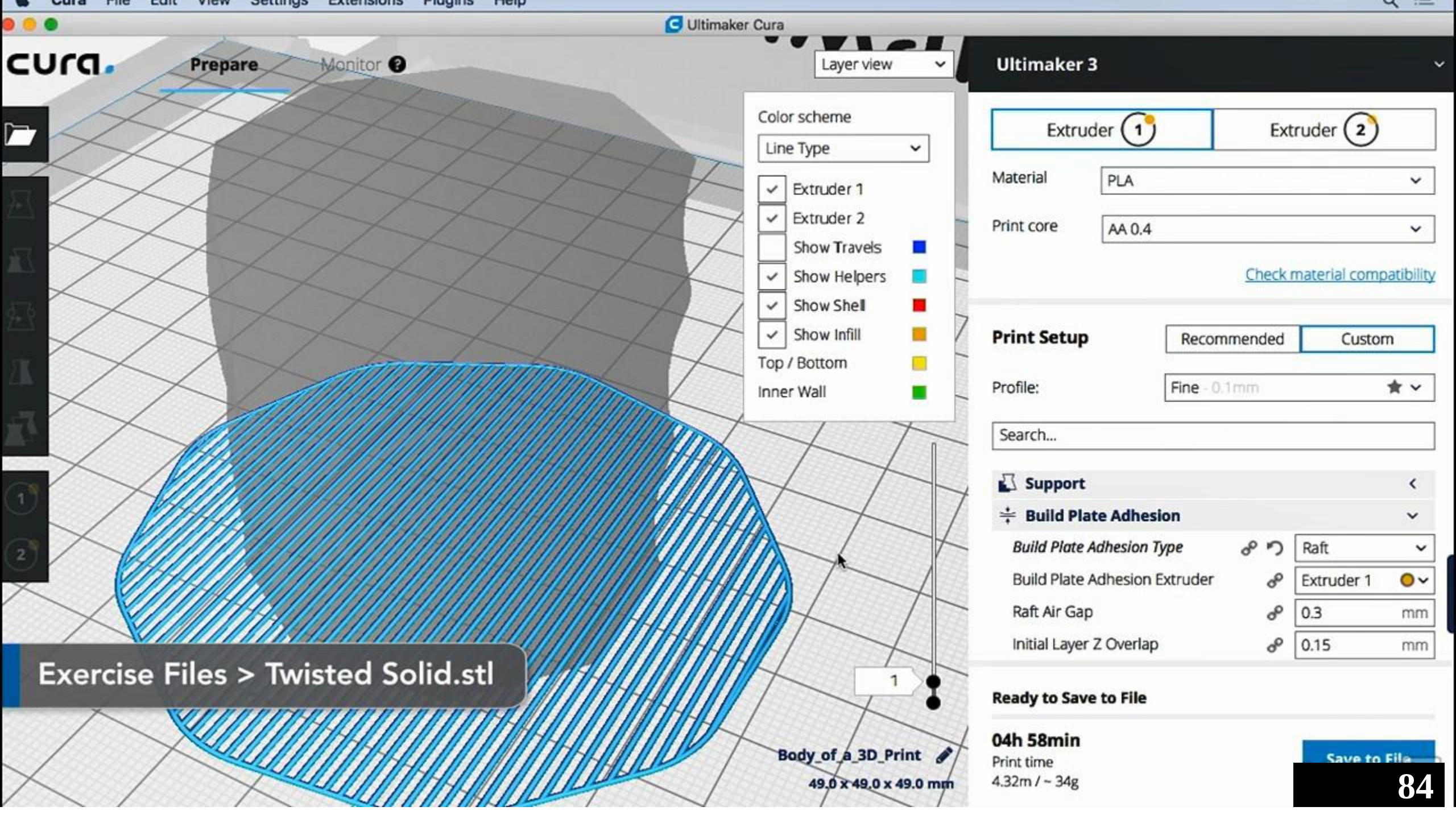
Add Custom Support

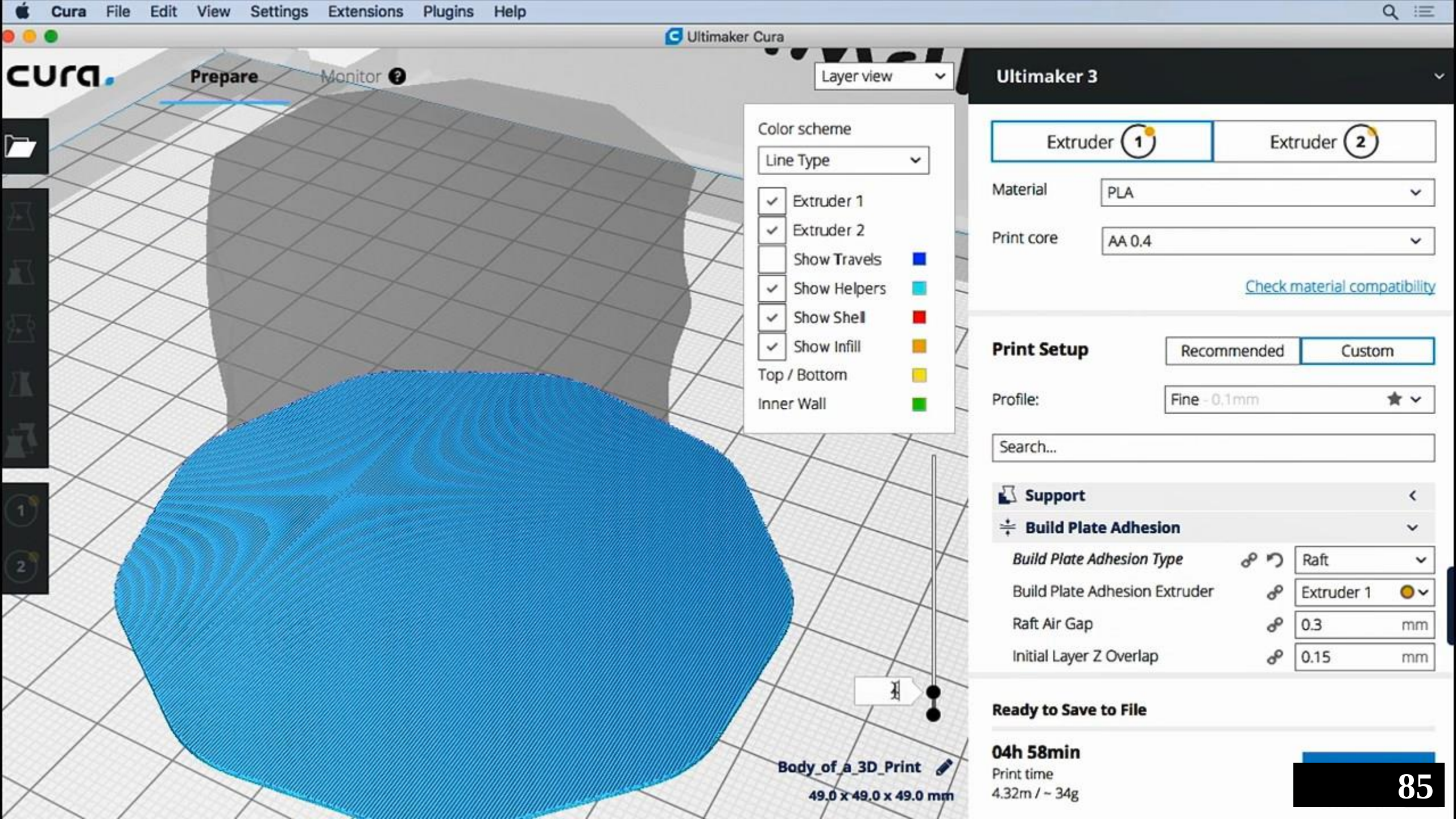


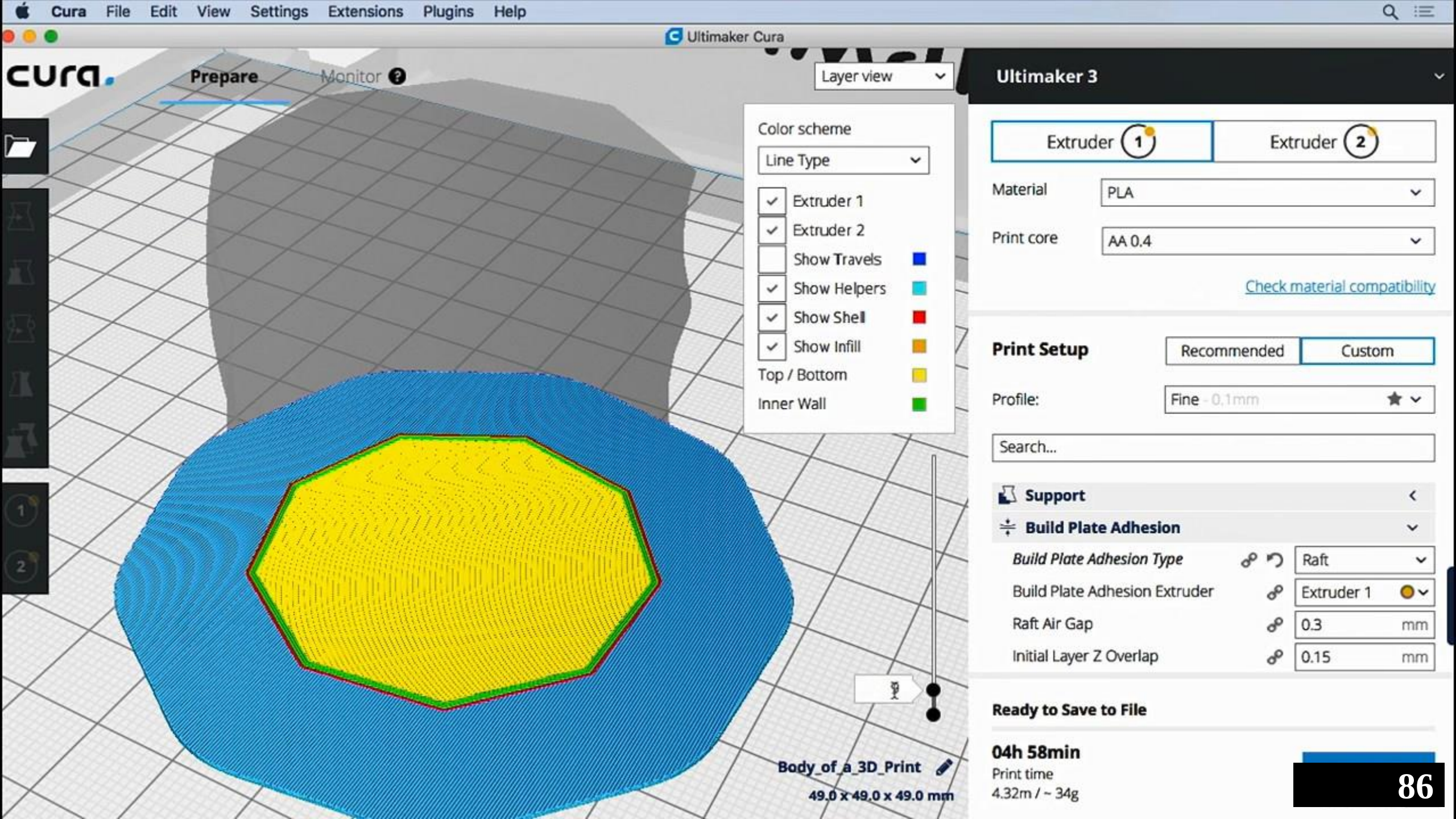
Add Custom Support

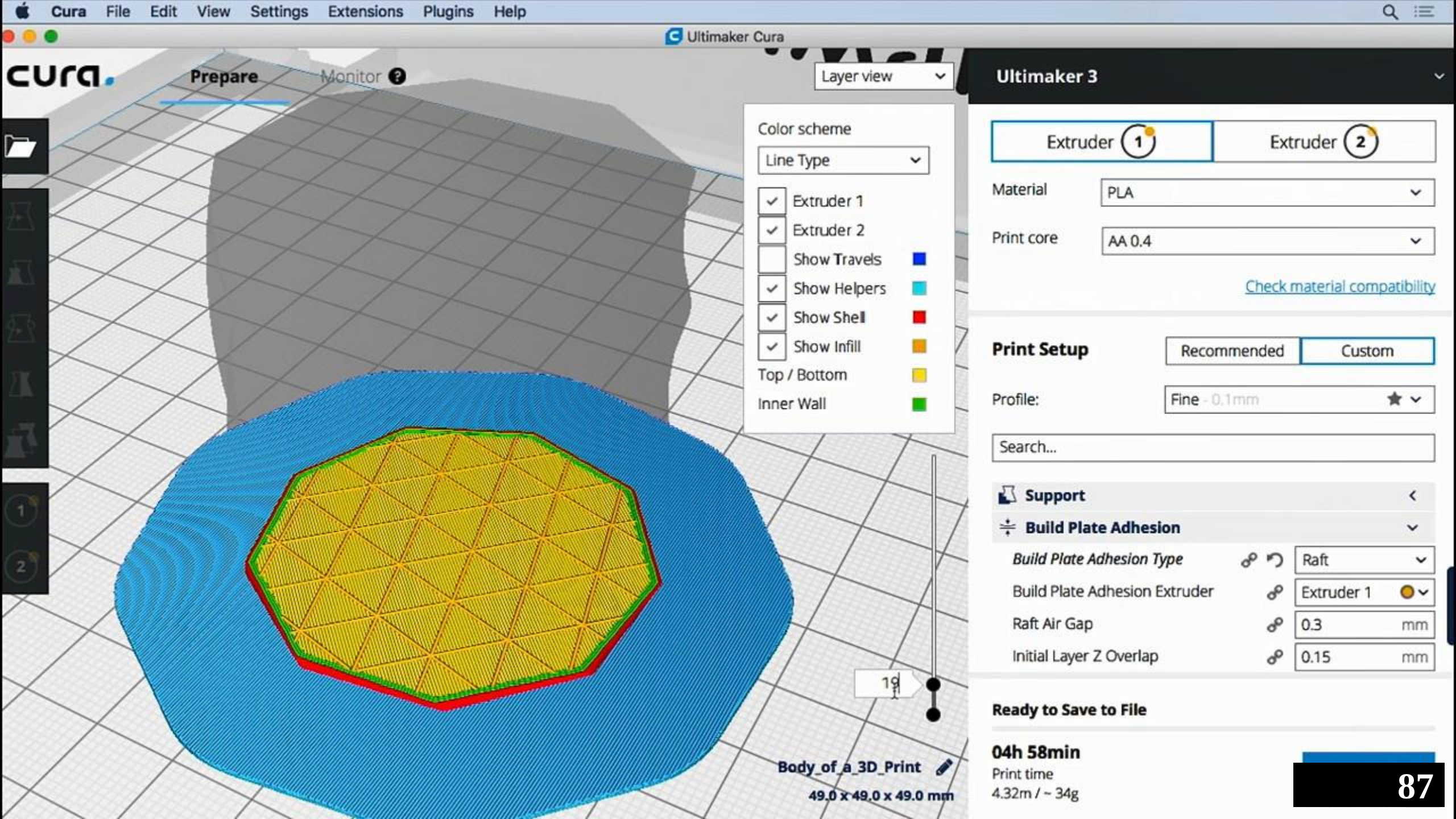


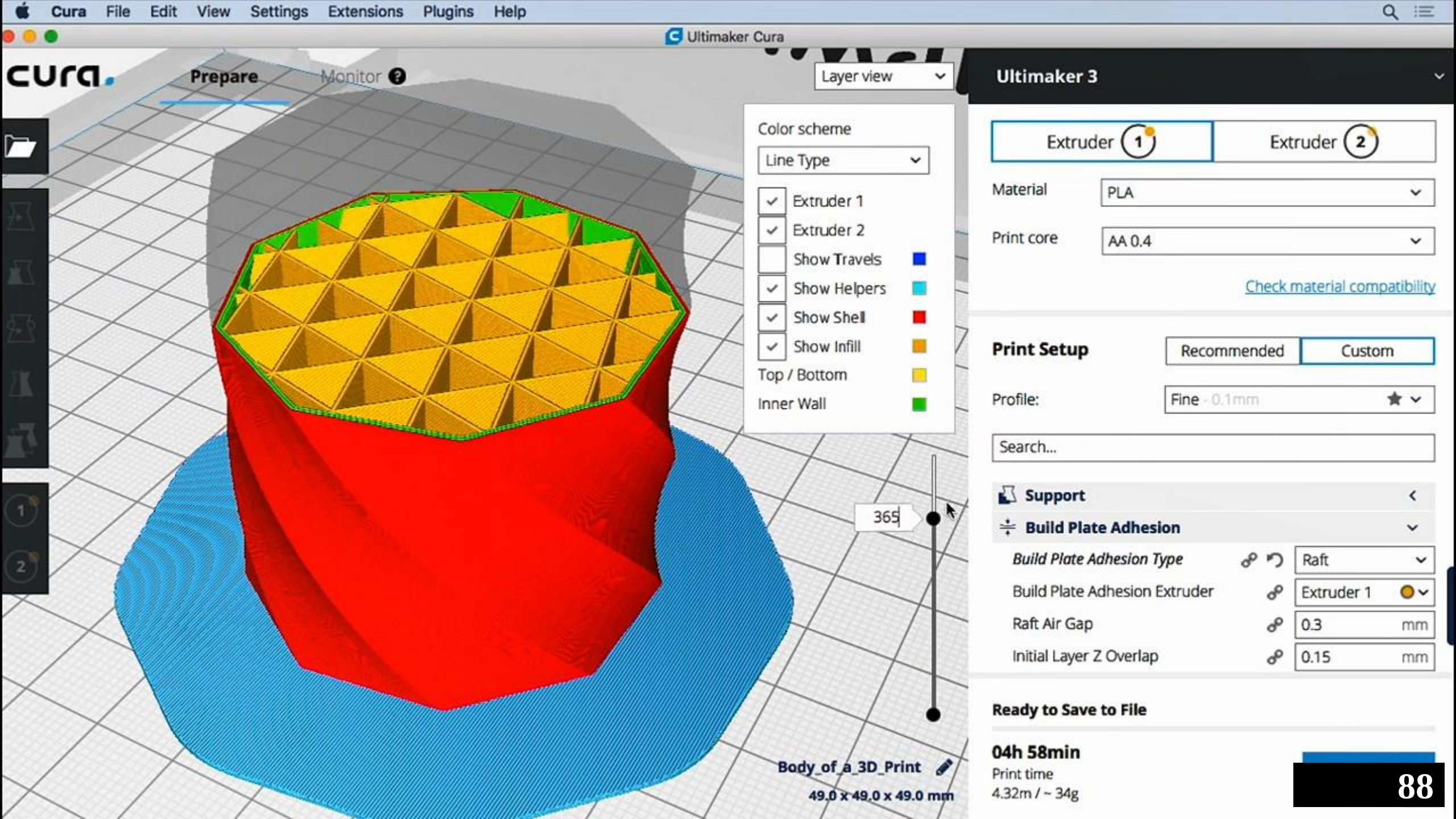
Body
of a 3D Print

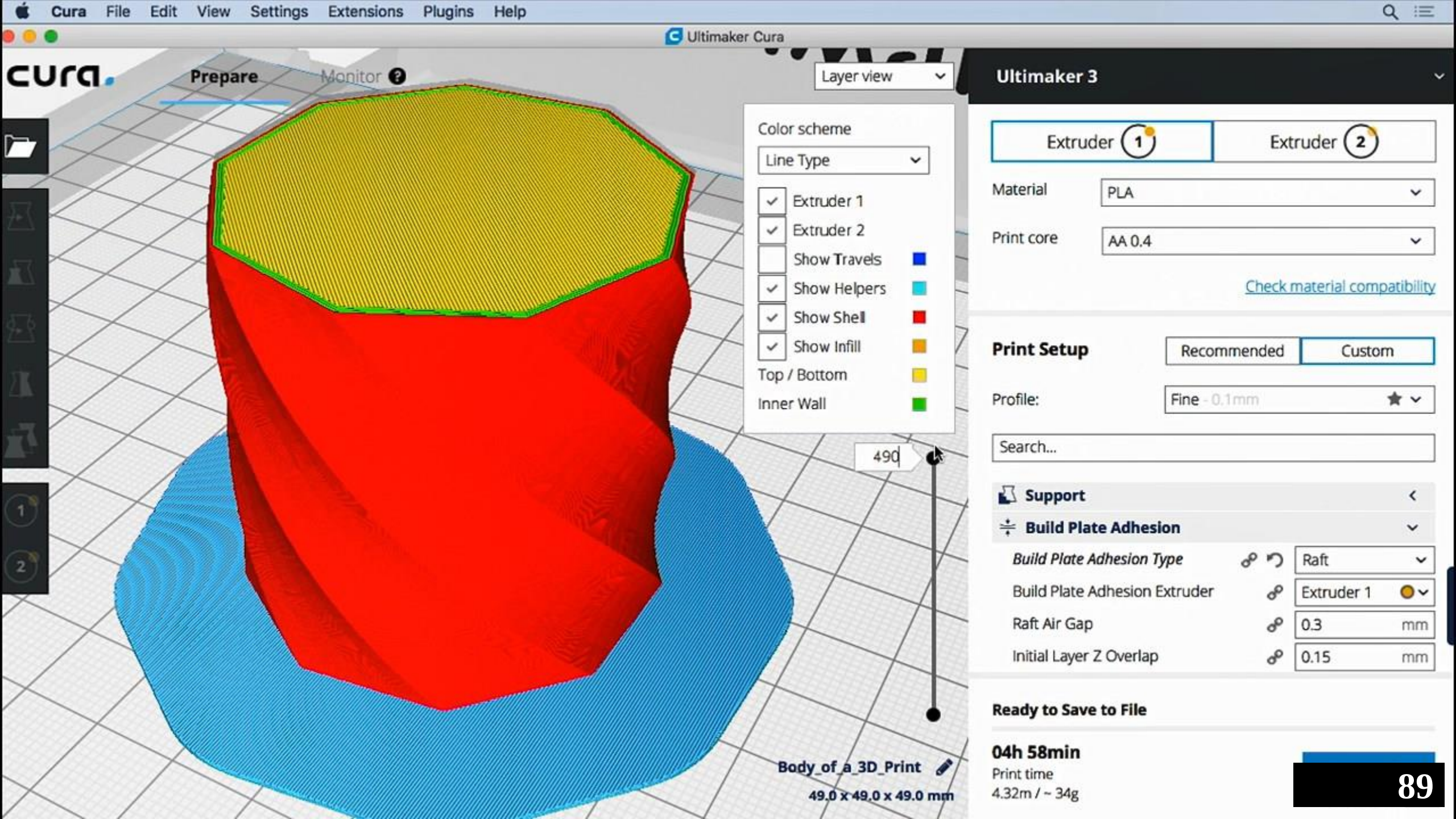

Ultimaker Cura
cura
Prepare
Monitor
Layer view
Color scheme
Line Type
Extruder 1
Extruder 2
Show Travels
Show Helpers
Show Shell
Show Infill
Top / Bottom
Inner Wall
Ultimaker 3
Extruder 1
Extruder 2
Material
PLA
Print core
AA 0.4
Check material compatibility
Print Setup
Recommended
Custom
Profile:
Fine - 0.1mm
Search...
Support
Build Plate Adhesion
Build Plate Adhesion Type
Raft
Build Plate Adhesion Extruder
Extruder 1
Raft Air Gap
0.3
mm
Initial Layer Z Overlap
0.15
mm
Ready to Save to File
04h 58min
Print time
4.32m / ~ 34g
Save to File
Exercise Files > Twisted Solid.stl
Body_of_a_3D_Print
49.0 x 49.0 x 49.0 mm


Cura File Edit View Settings Extensions Plugins Help
Ultimaker Cura
cura
Prepare
Monitor
Layer view
Color scheme
Line Type
Extruder 1
Extruder 2
Show Travels
Show Helpers
Show Shell
Show Infill
Top / Bottom
Inner Wall
Ultimaker 3
Extruder 1
Extruder 2
Material
PLA
Print core
AA 0.4
Check material compatibility
Print Setup
Recommended
Custom
Profile:
Fine - 0.1mm
Search...
Support
Build Plate Adhesion
Build Plate Adhesion Type
Raft
Build Plate Adhesion Extruder
Extruder 1
Raft Air Gap
0.3 mm
Initial Layer Z Overlap
0.15 mm
Ready to Save to File
04h 58min
Print time
4.32m / ~ 34g
Body_of_a_3D_Print
49.0 x 49.0 x 49.0 mm


Cura File Edit View Settings Extensions Plugins Help
Ultimaker Cura
cura
Prepare
Monitor
Layer view
Color scheme
Line Type
Extruder 1
Extruder 2
Show Travels
Show Helpers
Show Shell
Show Infill
Top / Bottom
Inner Wall
Ultimaker 3
Extruder 1
Extruder 2
Material
PLA
Print core
AA 0.4
Check material compatibility
Print Setup
Recommended
Custom
Profile:
Fine - 0.1mm
Search...
Support
Build Plate Adhesion
Build Plate Adhesion Type
Raft
Build Plate Adhesion Extruder
Extruder 1
Raft Air Gap
0.3 mm
Initial Layer Z Overlap
0.15 mm
Ready to Save to File
04h 58min
Print time
4.32m / ~ 34g
Body_of_a_3D_Print
49.0 x 49.0 x 49.0 mm

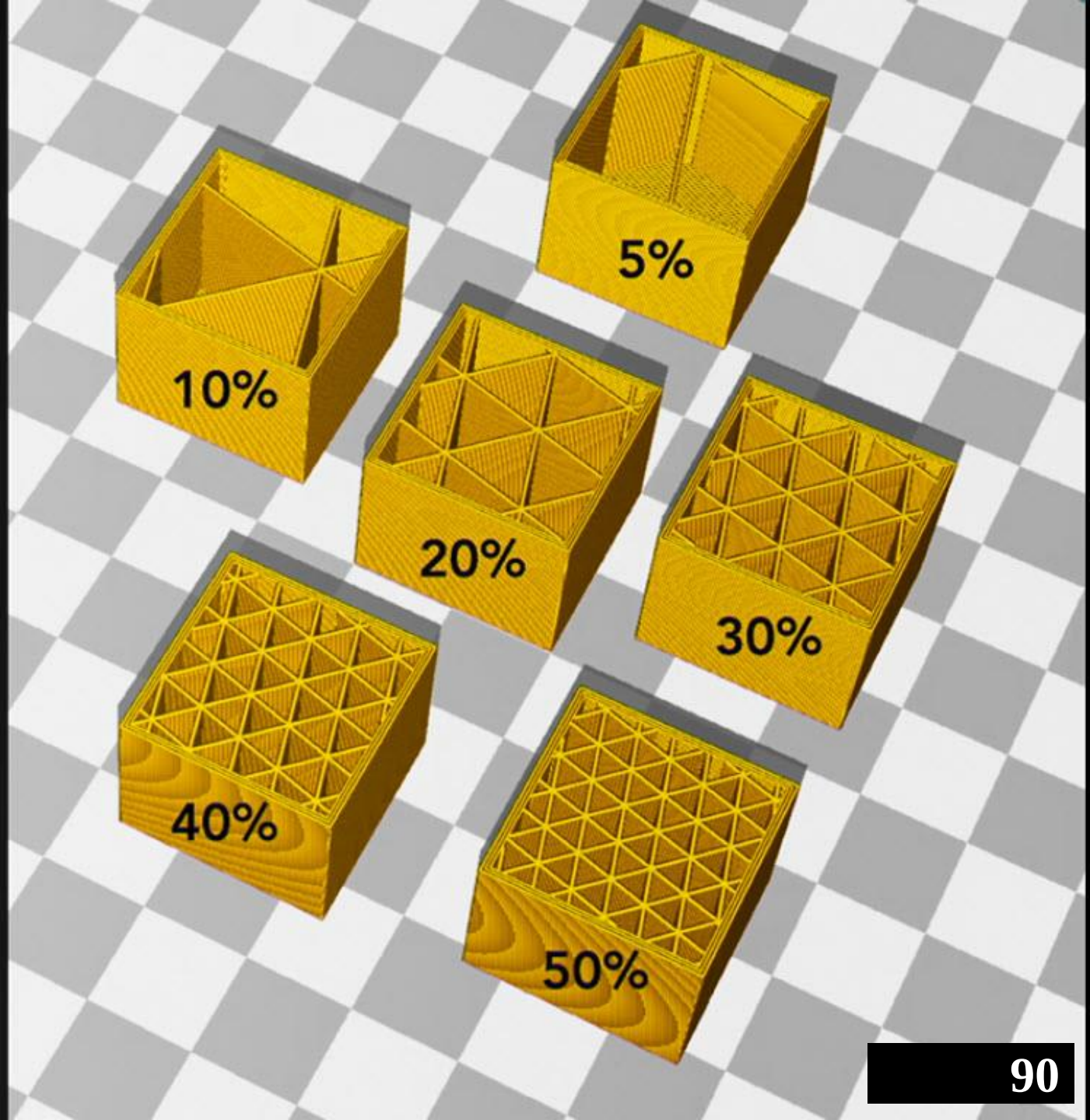

Cura File Edit View Settings Extensions Plugins Help
Ultimaker Cura
cura
Prepare
Monitor
Layer view
Color scheme
Line Type
Extruder 1
Extruder 2
Show Travels
Show Helpers
Show Shell
Show Infill
Top / Bottom
Inner Wall
Ultimaker 3
Extruder 1
Extruder 2
Material
PLA
Print core
AA 0.4
Check material compatibility
Print Setup
Recommended
Custom
Profile:
Fine - 0.1mm
Search...
Support
Build Plate Adhesion
Build Plate Adhesion Type
Raft
Build Plate Adhesion Extruder
Extruder 1
Raft Air Gap
0.3 mm
Initial Layer Z Overlap
0.15 mm
Ready to Save to File
04h 58min
Print time
4.32m / ~ 34g
Body_of_a_3D_Print
49.0 x 49.0 x 49.0 mm


Cura File Edit View Settings Extensions Plugins Help
Ultimaker Cura
cura
Prepare
Monitor
Layer view
Color scheme
Line Type
Extruder 1
Extruder 2
Show Travels
Show Helpers
Show Shell
Show Infill
Top / Bottom
Inner Wall
365
Body_of_a_3D_Print
49.0 x 49.0 x 49.0 mm
Ultimaker 3
Extruder 1
Extruder 2
Material
PLA
Print core
AA 0.4
Check material compatibility
Print Setup
Recommended
Custom
Profile:
Fine - 0.1mm
Search...
Support
Build Plate Adhesion
Build Plate Adhesion Type
Raft
Build Plate Adhesion Extruder
Extruder 1
Raft Air Gap
0.3 mm
Initial Layer Z Overlap
0.15 mm
Ready to Save to File
04h 58min
Print time
4.32m / ~ 34g


Cura File Edit View Settings Extensions Plugins Help
Ultimaker Cura
cura
Prepare
Monitor
Layer view
Color scheme
Line Type
Extruder 1
Extruder 2
Show Travels
Show Helpers
Show Shell
Show Infill
Top / Bottom
Inner Wall
490
Body_of_a_3D_Print
49.0 x 49.0 x 49.0 mm
Ultimaker 3
Extruder 1
Extruder 2
Material
PLA
Print core
AA 0.4
Check material compatibility
Print Setup
Recommended
Custom
Profile:
Fine - 0.1mm
Search...
Support
Build Plate Adhesion
Build Plate Adhesion Type
Raft
Build Plate Adhesion Extruder
Extruder 1
Raft Air Gap
0.3 mm
Initial Layer Z Overlap
0.15 mm
Ready to Save to File
04h 58min
Print time
4.32m / ~ 34g

Infill

- 5–50% are common

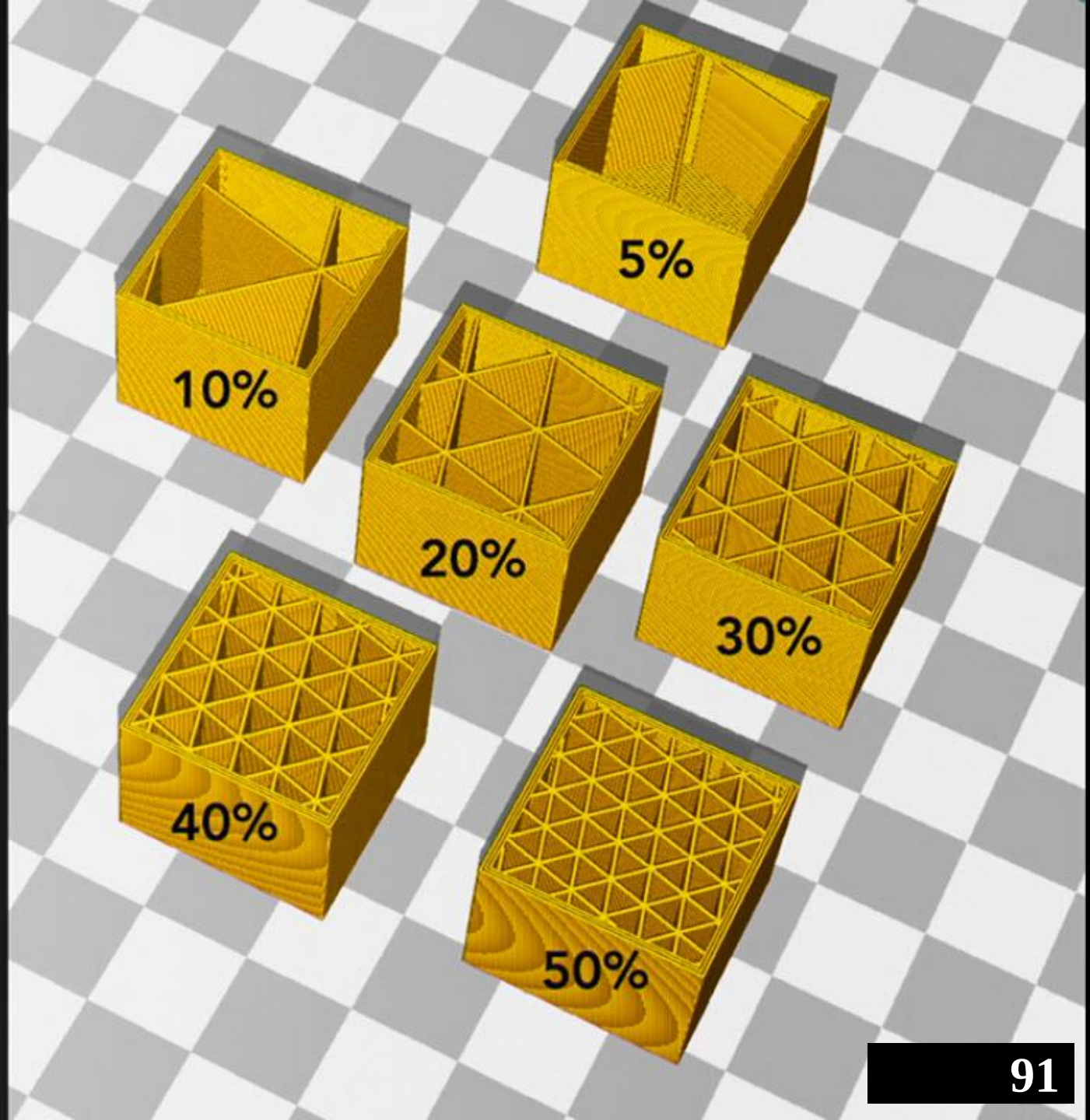


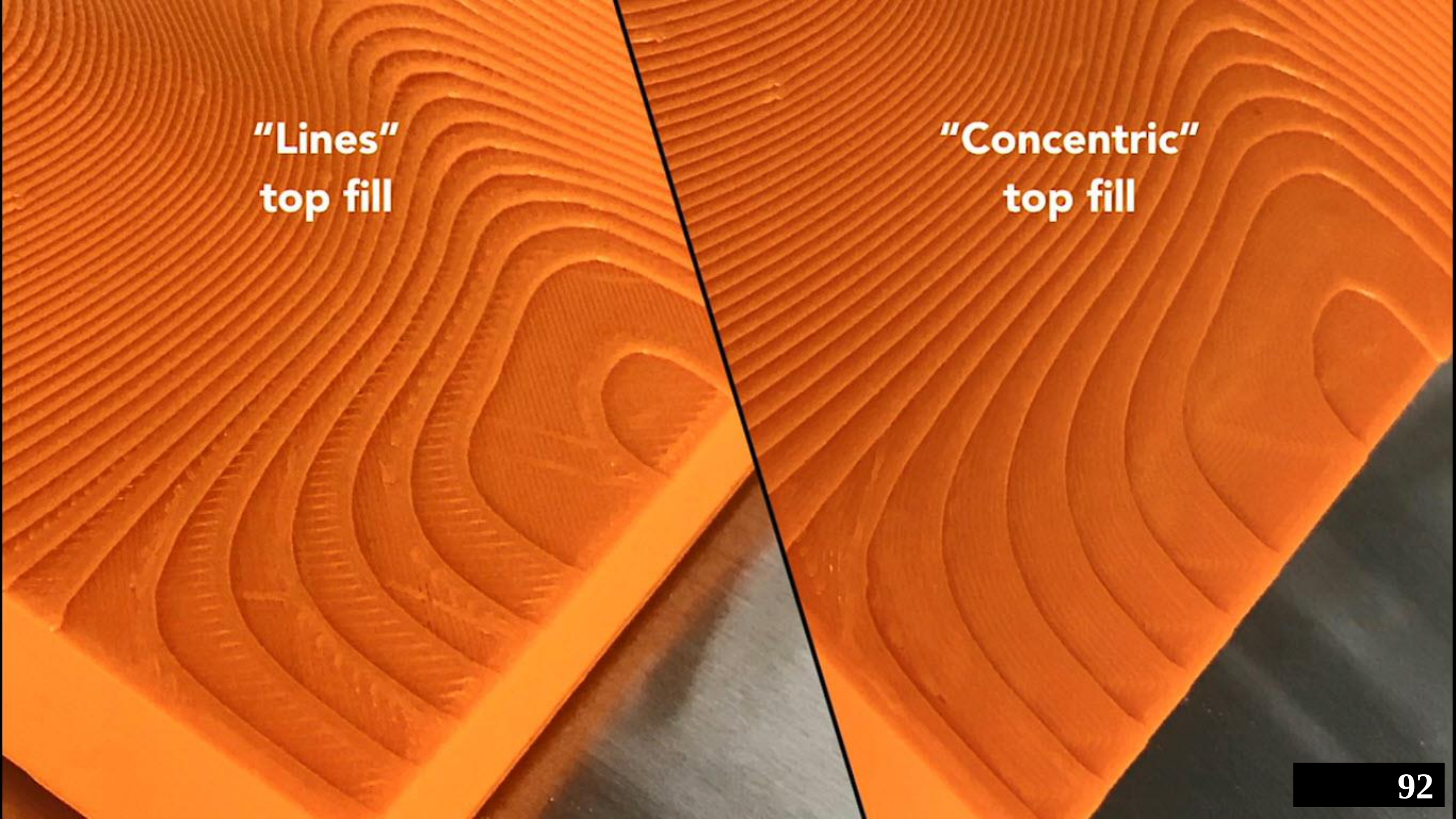
Add Strength

- Increase infill density
- Add shells
- Add top or bottom layers

Save Time

- Reduce infill and shells

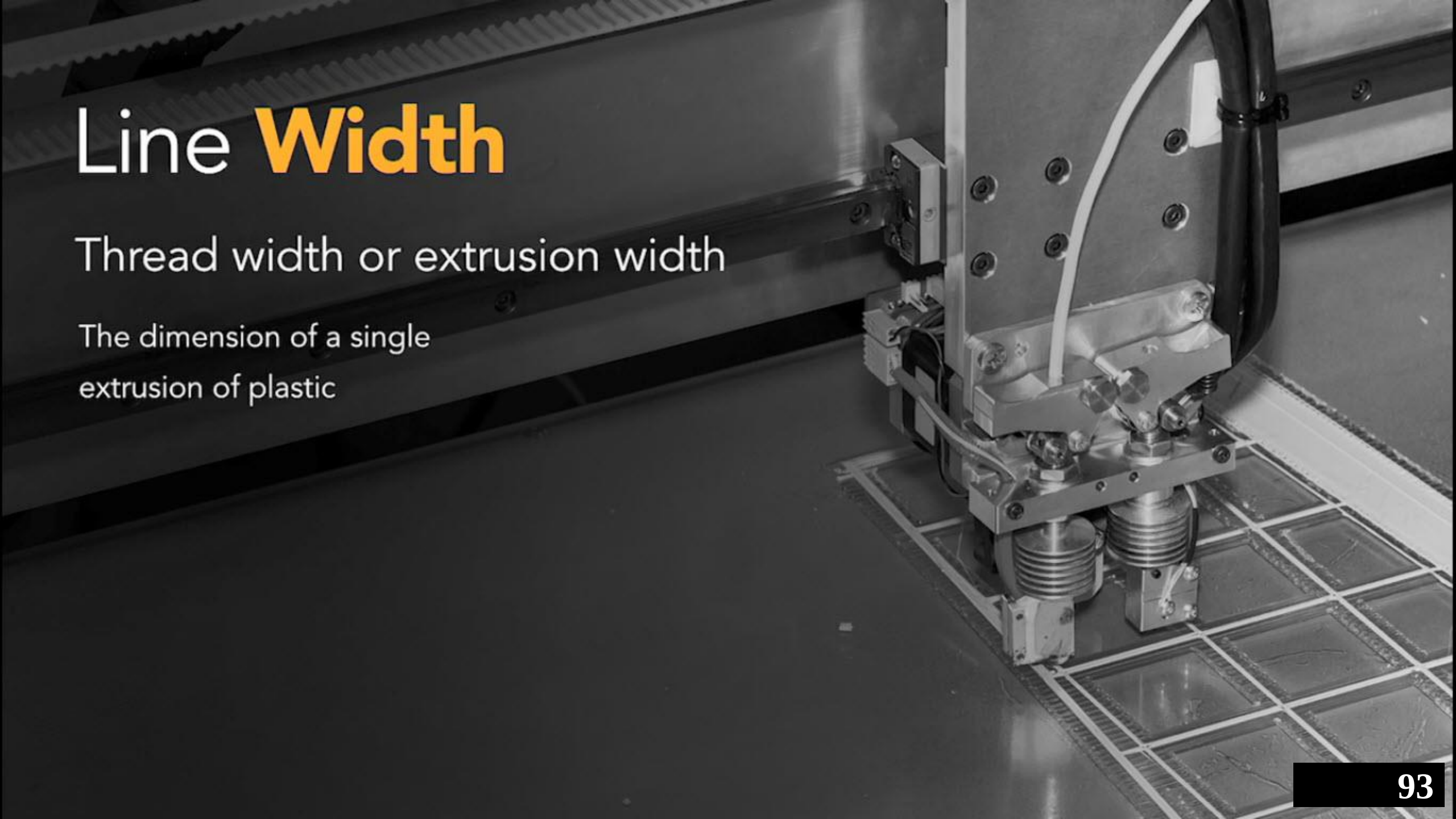



"Lines"
top fill
"Concentric"
top fill

Line **Width**

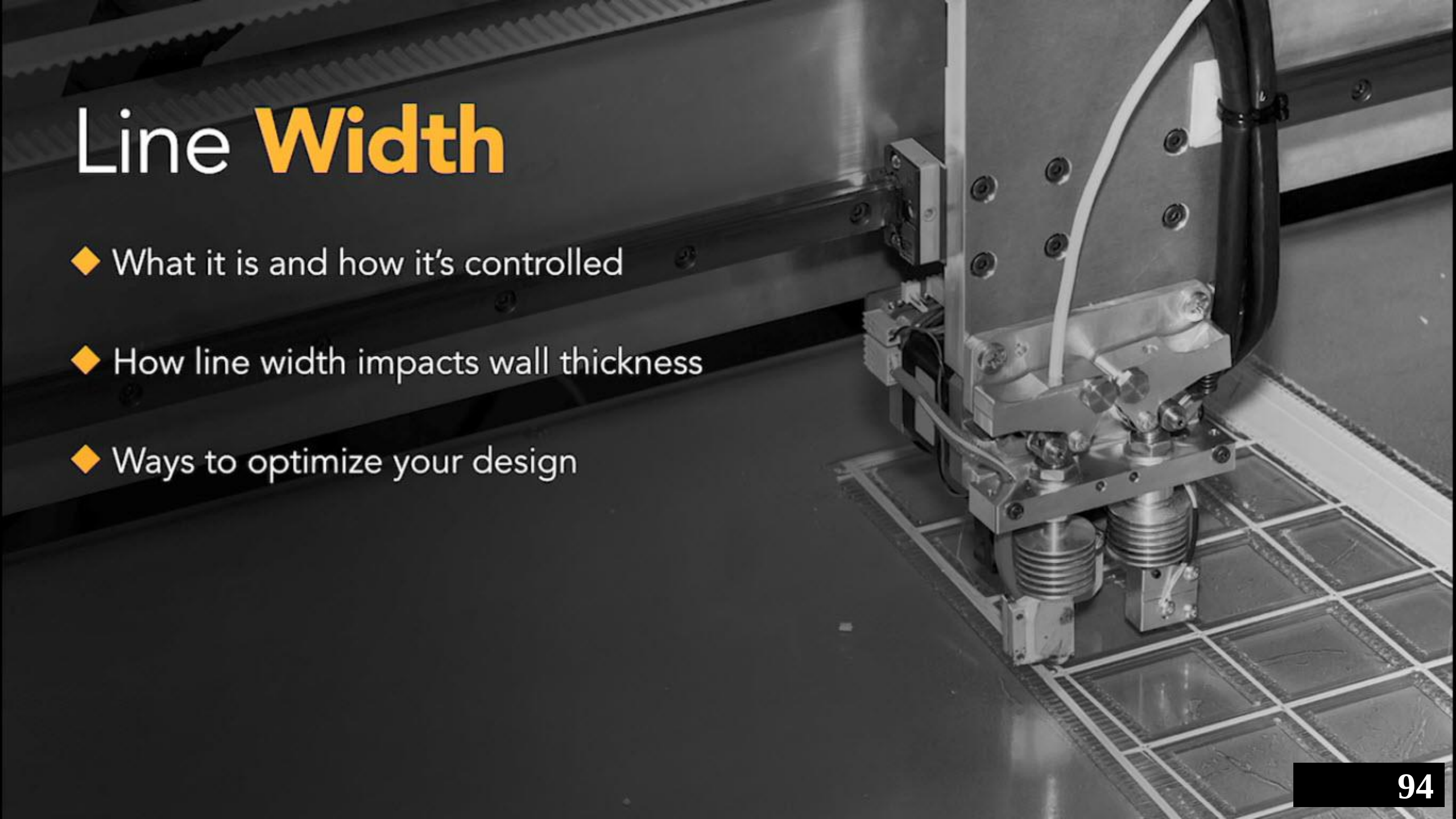
Thread width or extrusion width

The dimension of a single
extrusion of plastic



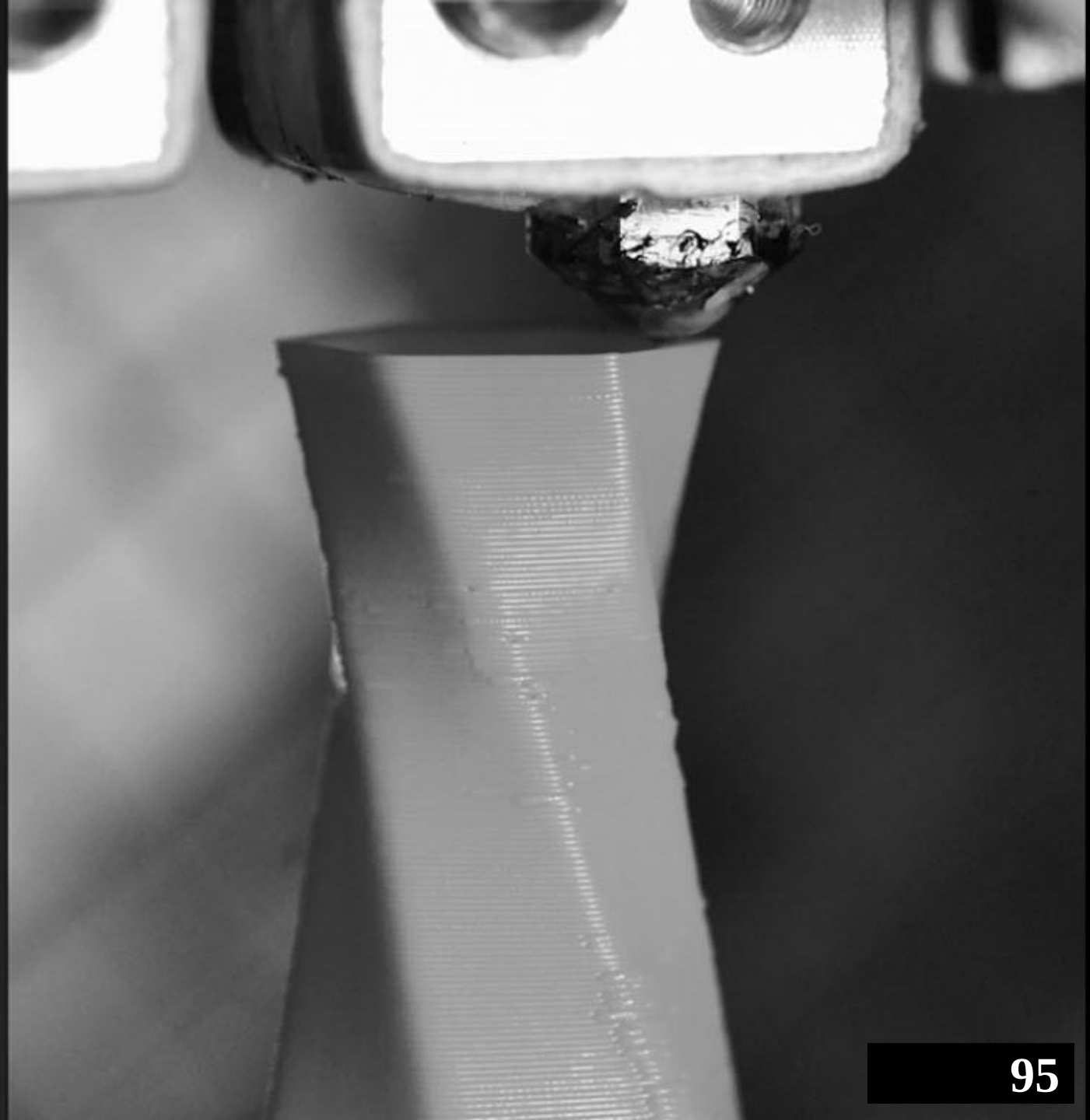
Line **Width**

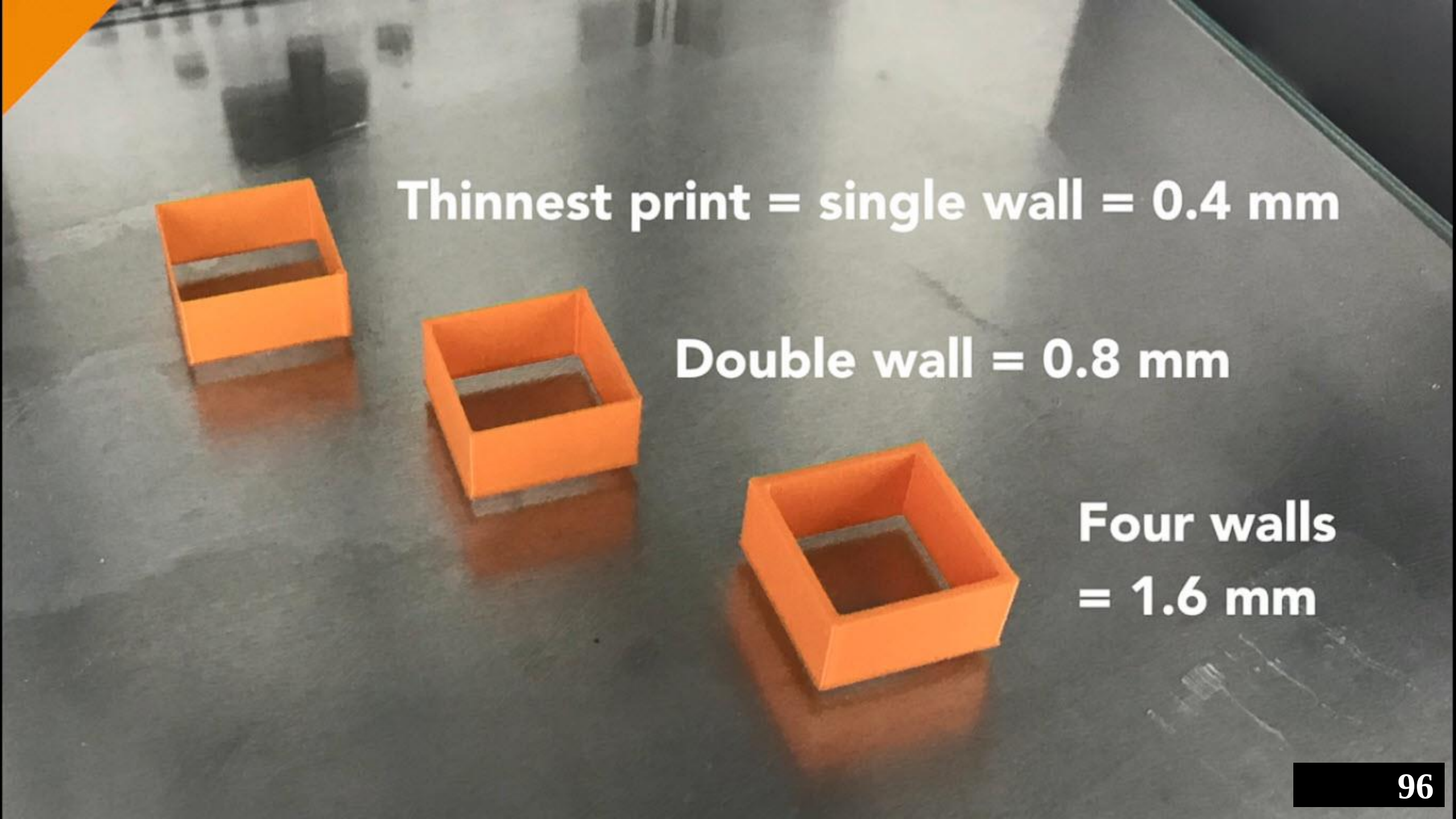
- What it is and how it's controlled
- How line width impacts wall thickness
- Ways to optimize your design

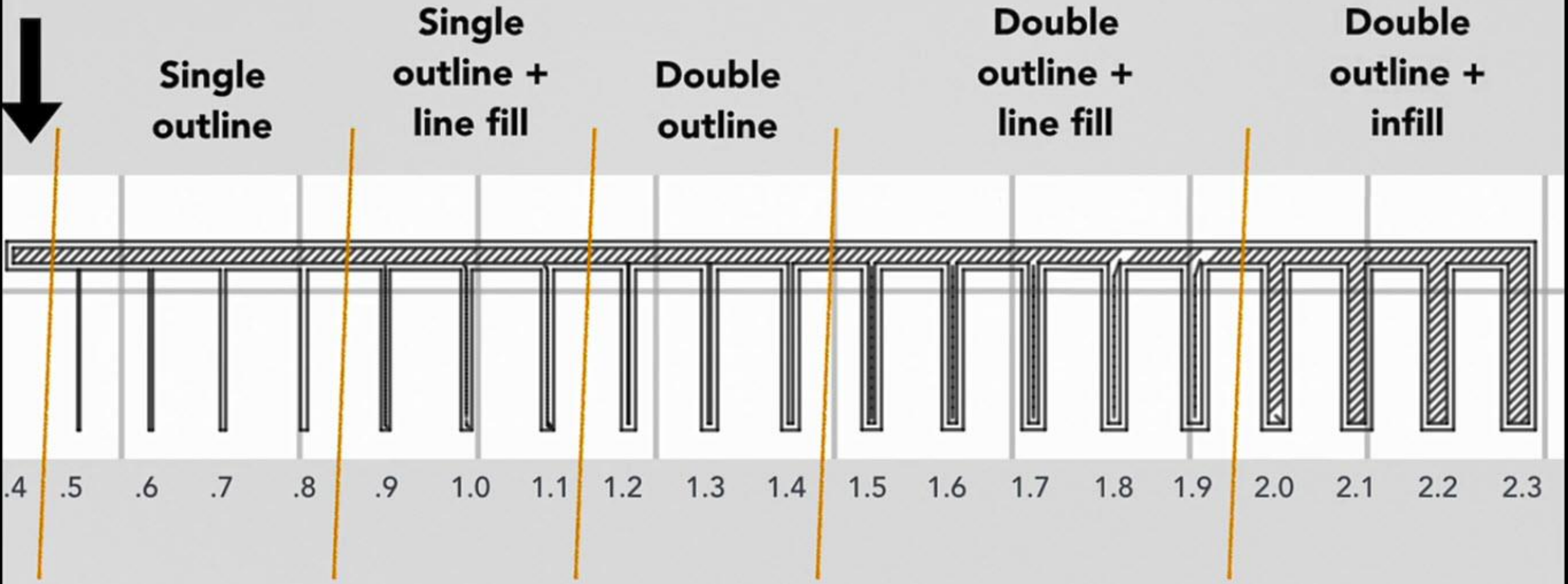


Nozzle Size

- Common nozzle sizes are 0.35 mm–0.5 mm.
- Nozzle size is approximately equal to the default line width.
- You can set a slightly smaller or larger line-width value.




Thinnest print = single wall = 0.4 mm
Double wall = 0.8 mm
Four walls
= 1.6 mm


Single outline
Single outline + line fill
Double outline
Double outline + line fill
Double outline + infill
.4
.5
.6
.7
.8
.9
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
1.7
1.8
1.9
2.0
2.1
2.2
2.3
Wall thickness in millimeters

Optimizing
Line Width

1. Design as you wish in CAD, then adjust your setting in your slicer to optimize.

2. Test your slicer to find a value that works best, then use that value to design in your CAD software.

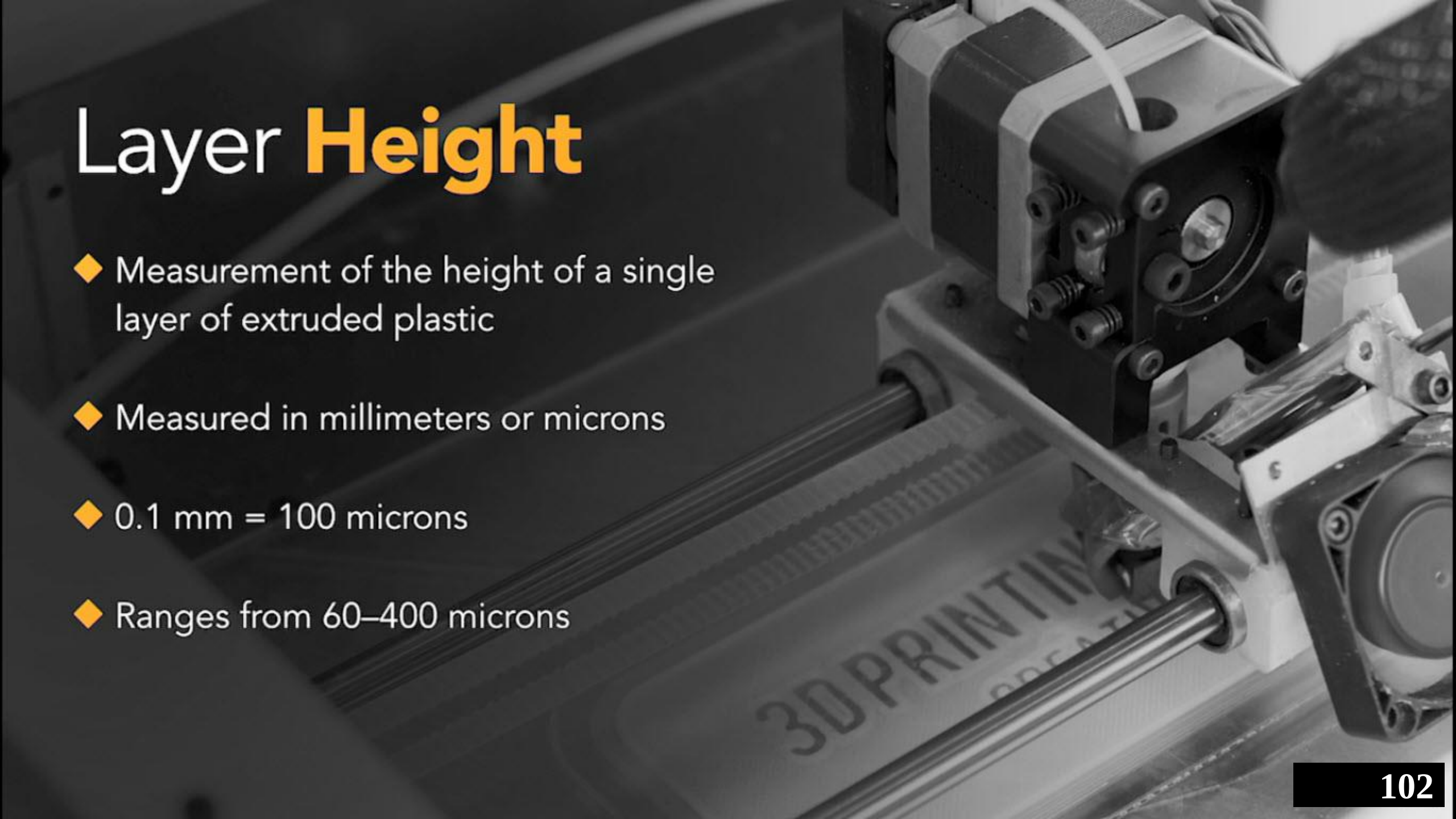
Slicer Settings for Wall Thickness

- Line width
- Wall thickness
- Wall line count
- Number of shells
- Number of perimeters

Layer Height
And Resolution

Layer **Height**

- Measurement of the height of a single layer of extruded plastic
- Measured in millimeters or microns
- 0.1 mm = 100 microns
- Ranges from 60–400 microns



300 microns
100 microns

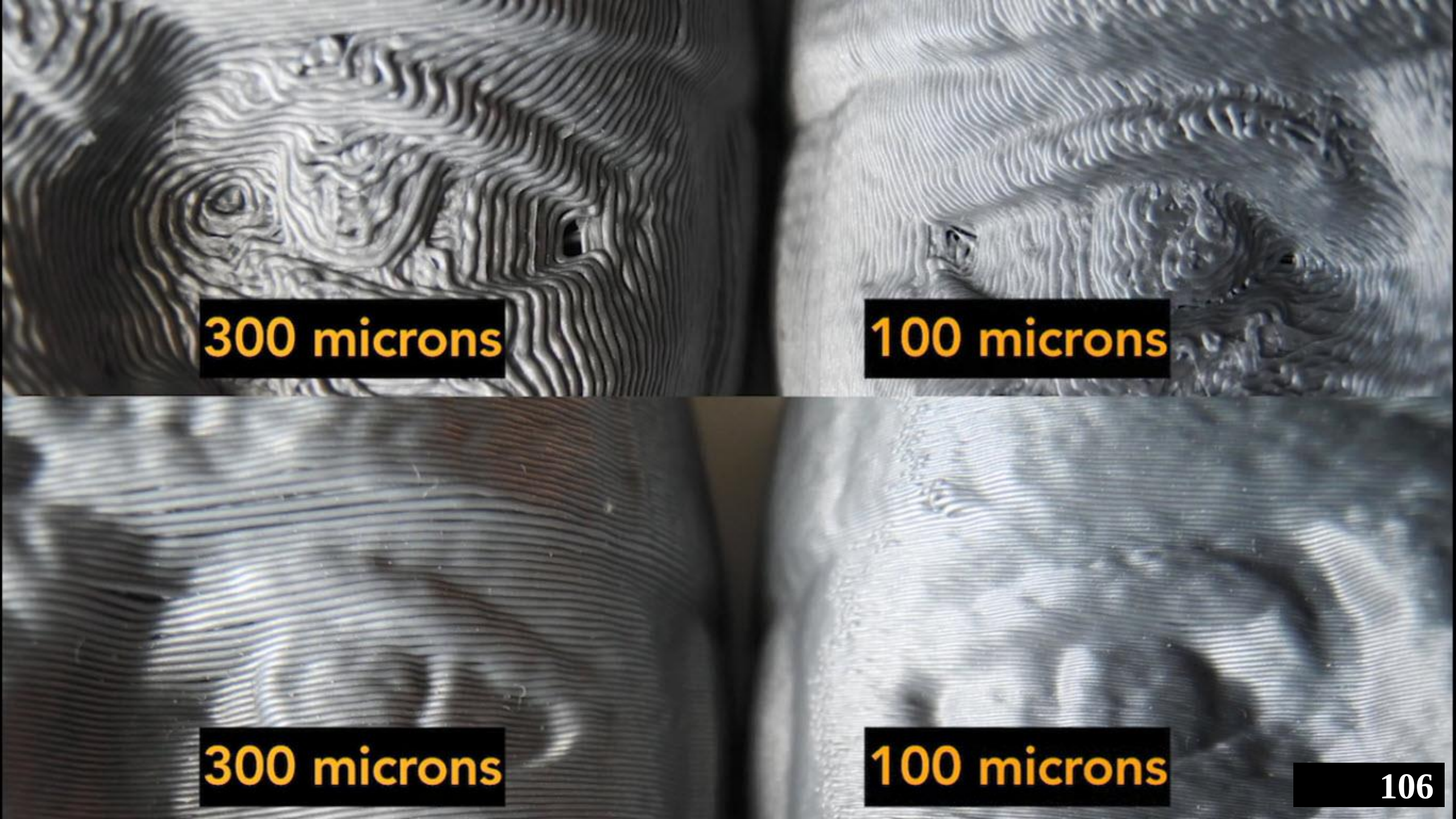
Layer height ≠ Resolution or quality

Line width impacts appearance.

Z resolution = 60 microns

XY resolution = 400 microns

Z resolution is more than six times better than XY resolution.


300 microns
100 microns
300 microns
100 microns

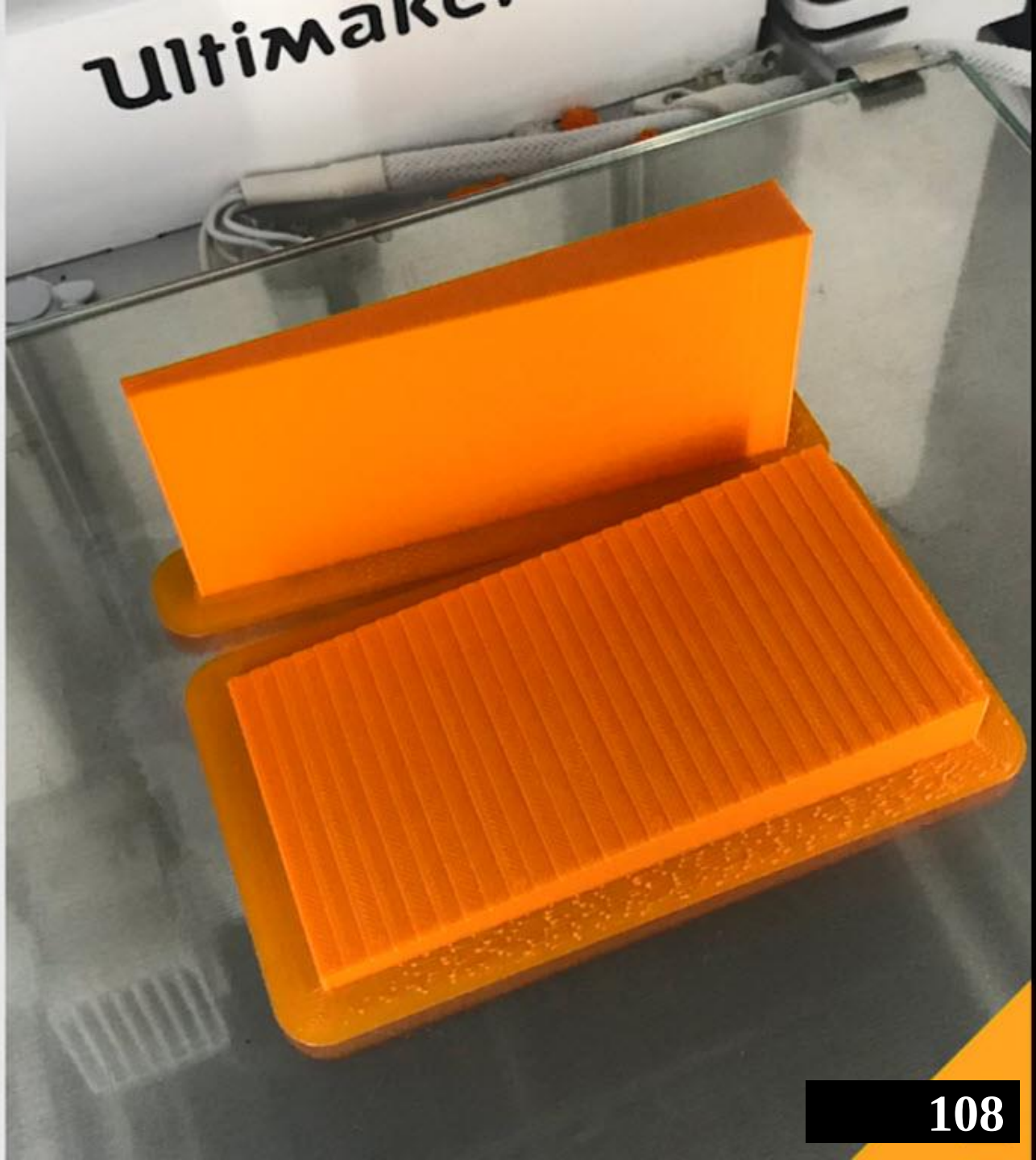
What are the most essential factors that influence the layer’s thickness selection?

Time

Appearance

Appearance

- Subtle slopes benefit from higher layer heights.
- Reorient your design to take advantage of the higher resolution along the Z-axis.



Appearance

- Layer lines are less apparent on vertical shapes.
- Save time with thicker layers.

Appearance

- Eliminate slopes that don't serve a function.
- A flat plane or steeper angle will look more attractive in a 3D print.

Creating
Small Details

Small **Details**

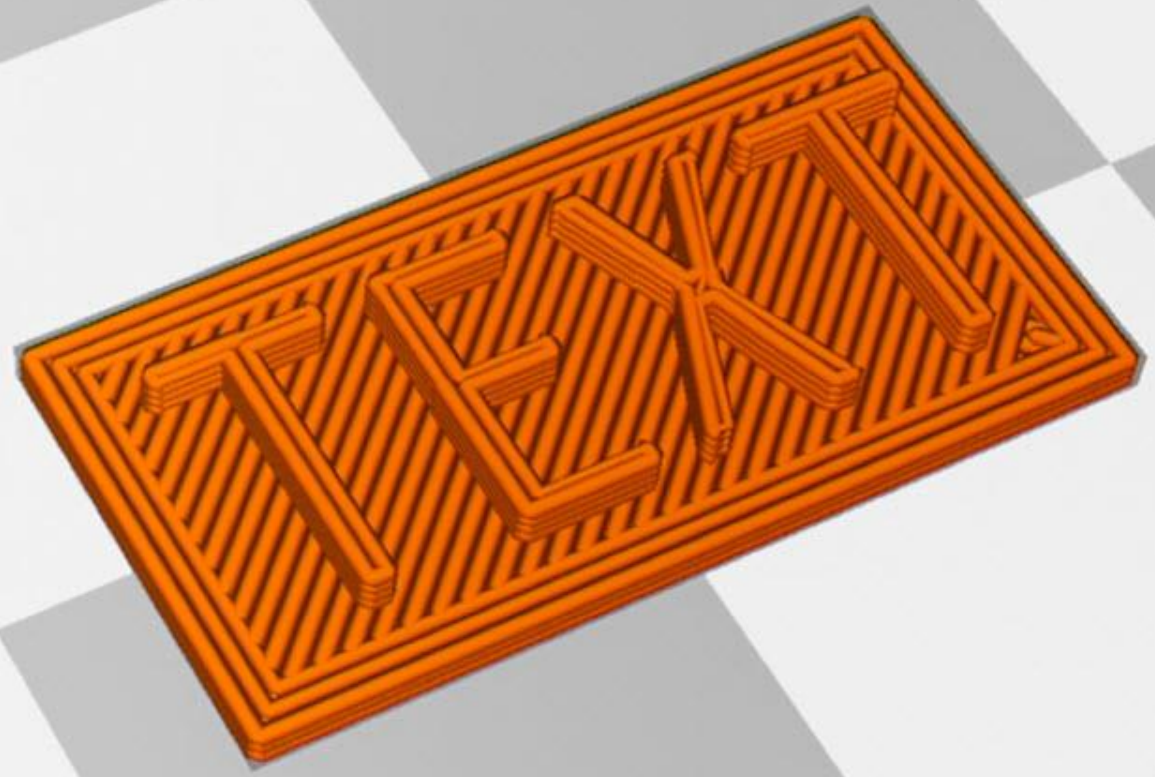
- The minimum dimension of small details, like text or a thin cylinder, is dictated by line width
- Theoretical minimum is twice the line width
- With a line width of 0.4 mm, the minimum is 0.8 mm
- 1.0 mm is a good place to start

Small **Details**

- Use larger diameters on taller features.
- Add a taper or flanged base.
- Lower speed
- Increase minimum layer time.

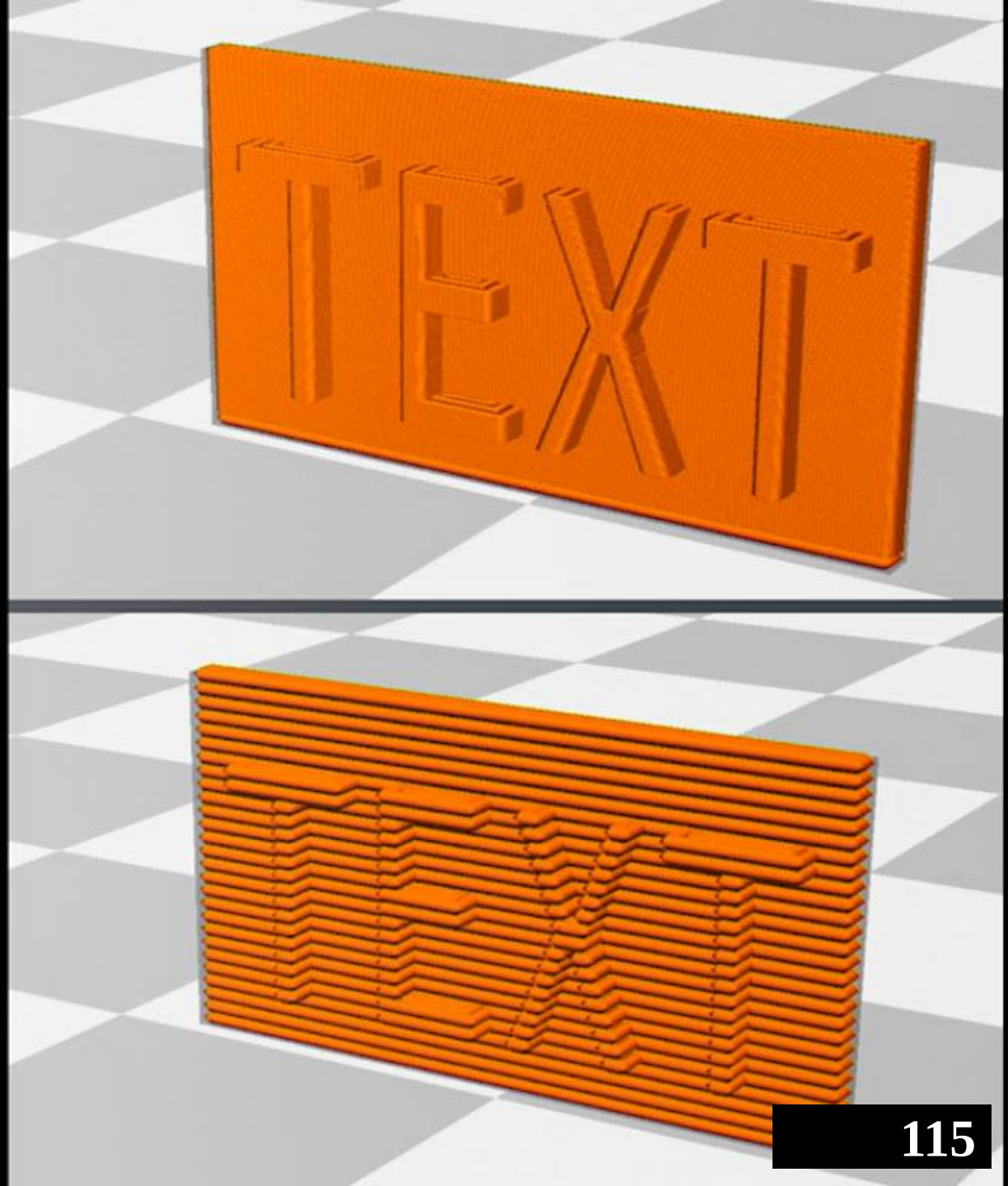
Text

On a horizontal plane, the stroke of a letter needs to be more than twice the line width.



Text

- On a vertical plane, thinner layers will help with readability.
- Technically breaks 45 degree rule
- Embossed features = 1.0–2.0 mm



Achieving
Accuracy and Fit

Tolerance

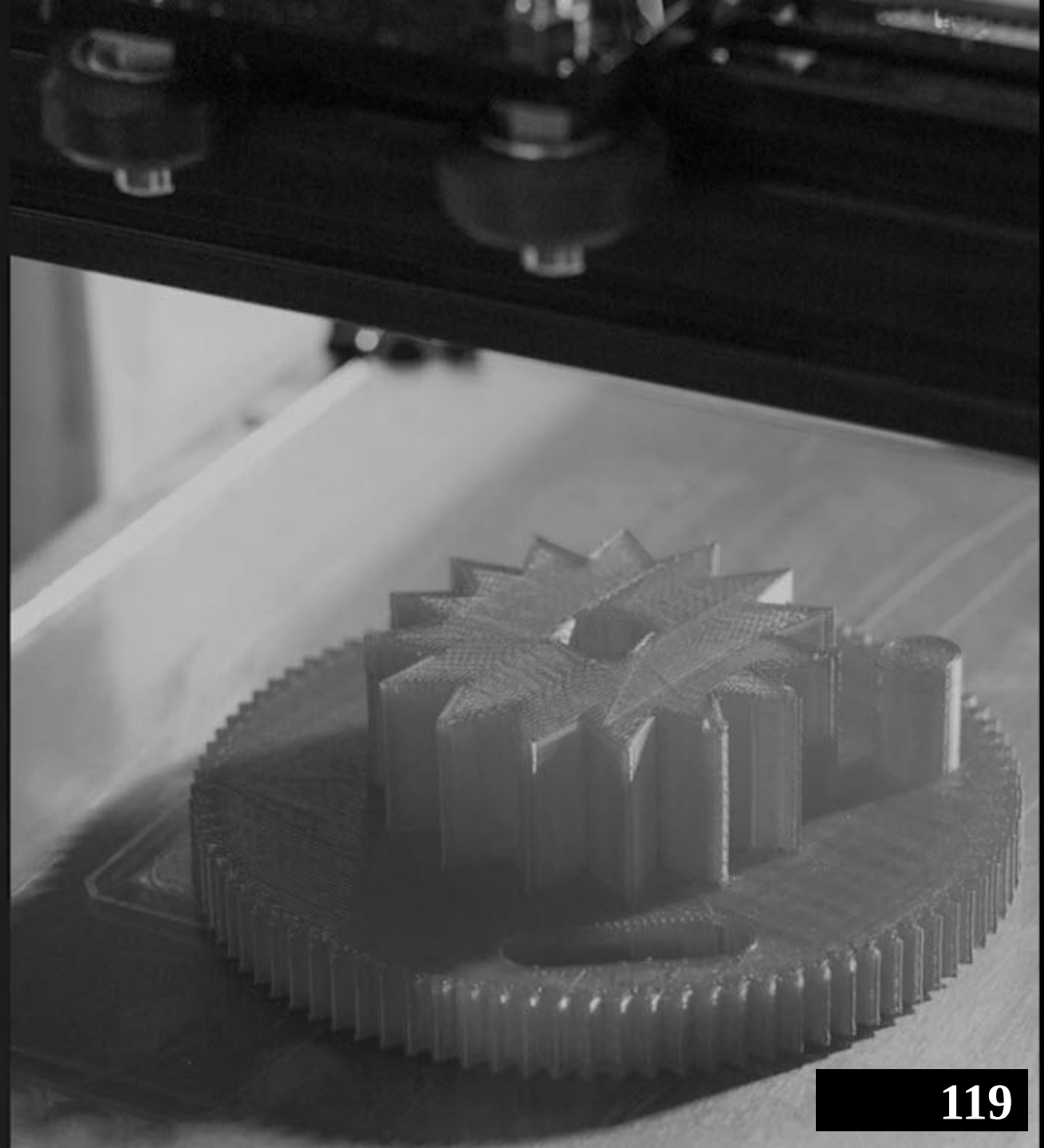
- The permissible range of variation in the dimensions of an object
- Commercial systems publish tolerance information, but many systems do not
- To test a printer, print a part with known dimensions and measure with calipers
- Expect tolerance +/– 0.1 to 1.0 mm

Filament Diameter

- Measure your filament in several places and average them. Input this value into your slicer

Engineering Fit

- To fit together properly, mated parts require clearance
- 0.25 mm clearance for tight fit
- 0.4 mm clearance for loose fit



Achieve an Excellent Fit

- Reduce the element in your design to a test piece
- Print, test fit, and incorporate knowledge into your CAD design
- Print several iterations

Planning for
Strength and Flexibility

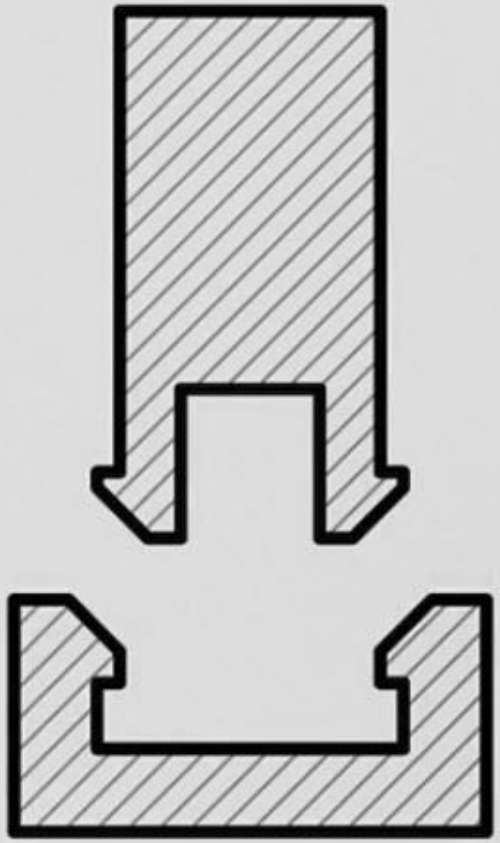
Material **Choice**

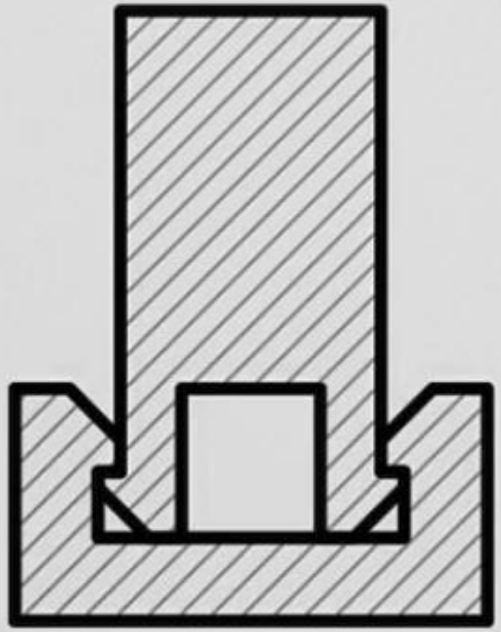
- Different thermoplastics have different properties
- For functional prototypes and end-use parts, Nylon, CPE, PC, and ABS are common choices
- PLA is not the best choice for end-use parts
- For flexibility, Nylon, Polypropylene, TPU, and other flexible filaments are good choices

Rules of Thumb

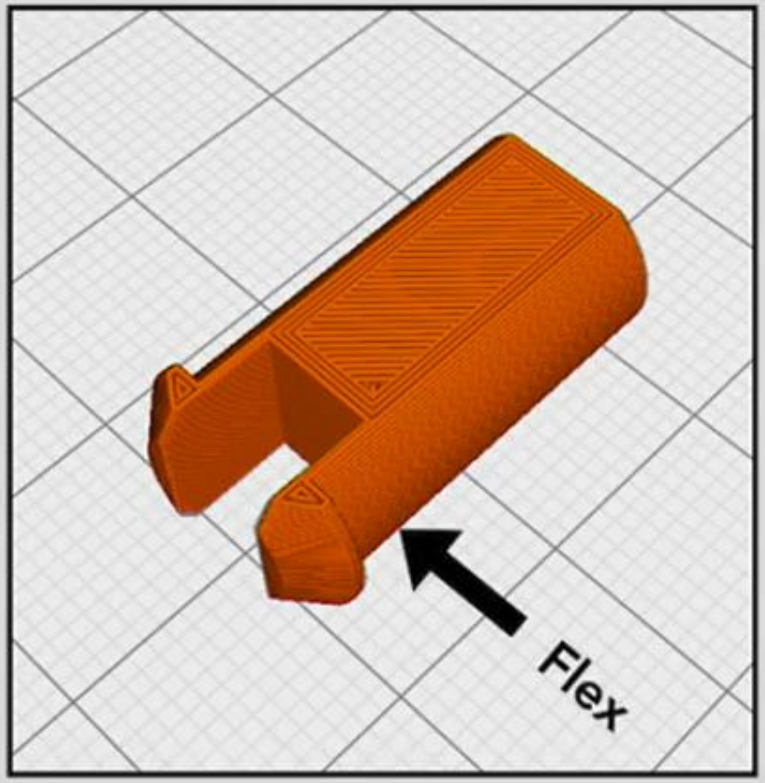
- Thick walls are stronger than thin walls
- More shells are stronger than less shells
- Denser infill is stronger than less infill
- Orientation matters

Orientation

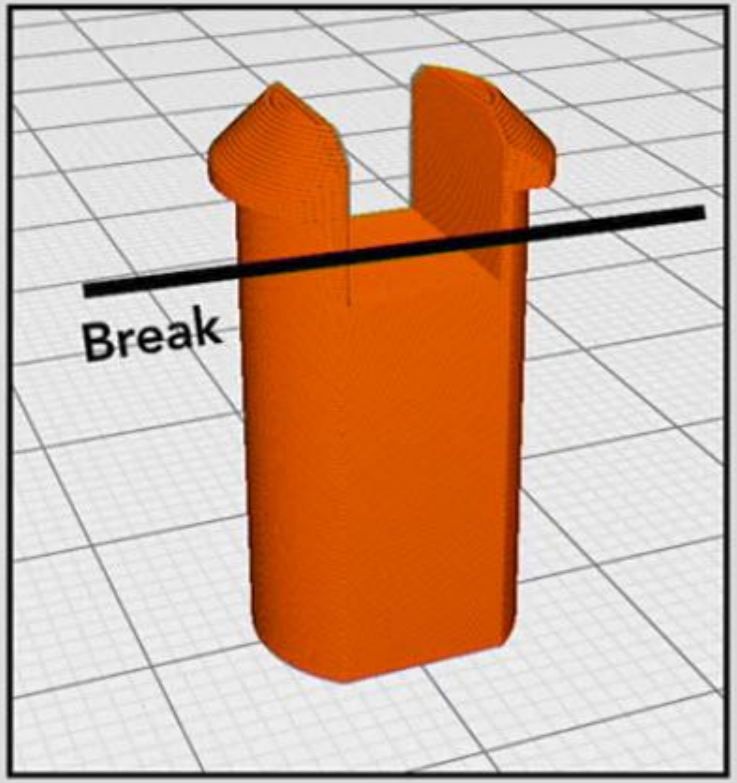




Orientation



Printed horizontally



Printed vertically

Orient your parts so the stress is perpendicular to the layer lines.

Exploring
Color

Single Extruder

- Change color midway through a print
- Pause, change, purge, and restart
- Third-party app

Chrome File Edit View History Bookmarks People Window Help

ColorPrint - Prusa Printers

Secure | https://www.prusaprinters.org/color-print/

PRUSA PRINTERS

Home | Calculator | Color Print | Prusa i3 | Original Prusa i3 kit | Blog | Forums

COLORPRINT

Home / ColorPrint

This simple tool helps you **3D print multi-colored objects** by simply embedding special commands into your existing g-code files to instruct the printer to stop at specific layer heights where you can manually change filament. It was developed and tested mainly for **Original Prusa i3 from Josef Prusa with specialized ColorPrint support**, but it should somehow work with every FFF printer which supports basic **M600** command.

G-code is supported from **Slic3r, Cura, KISSlicer** and **Simplify3D**.

How to use ColorPrint

Check out out videoguide how to use it and if you need more information see our detailed guide.

https://www.prusaprinters.org/color-print

RECENT POSTS

- Original Prusa i3 MK3 is out! And it's bloody smart!
- Printing soluble interface supports with Prusa i3 MK2 Multi Material
- PrusaControl release
- Update on Multi Material Upgrade #2
- Original Prusa i3 MK2S release

@JOSEFPRUSA LATEST TWEETS

Josef Prusa @josefprusa — 4 days ago

World is in correct order finally 🙌Thank

Multiple Extruders

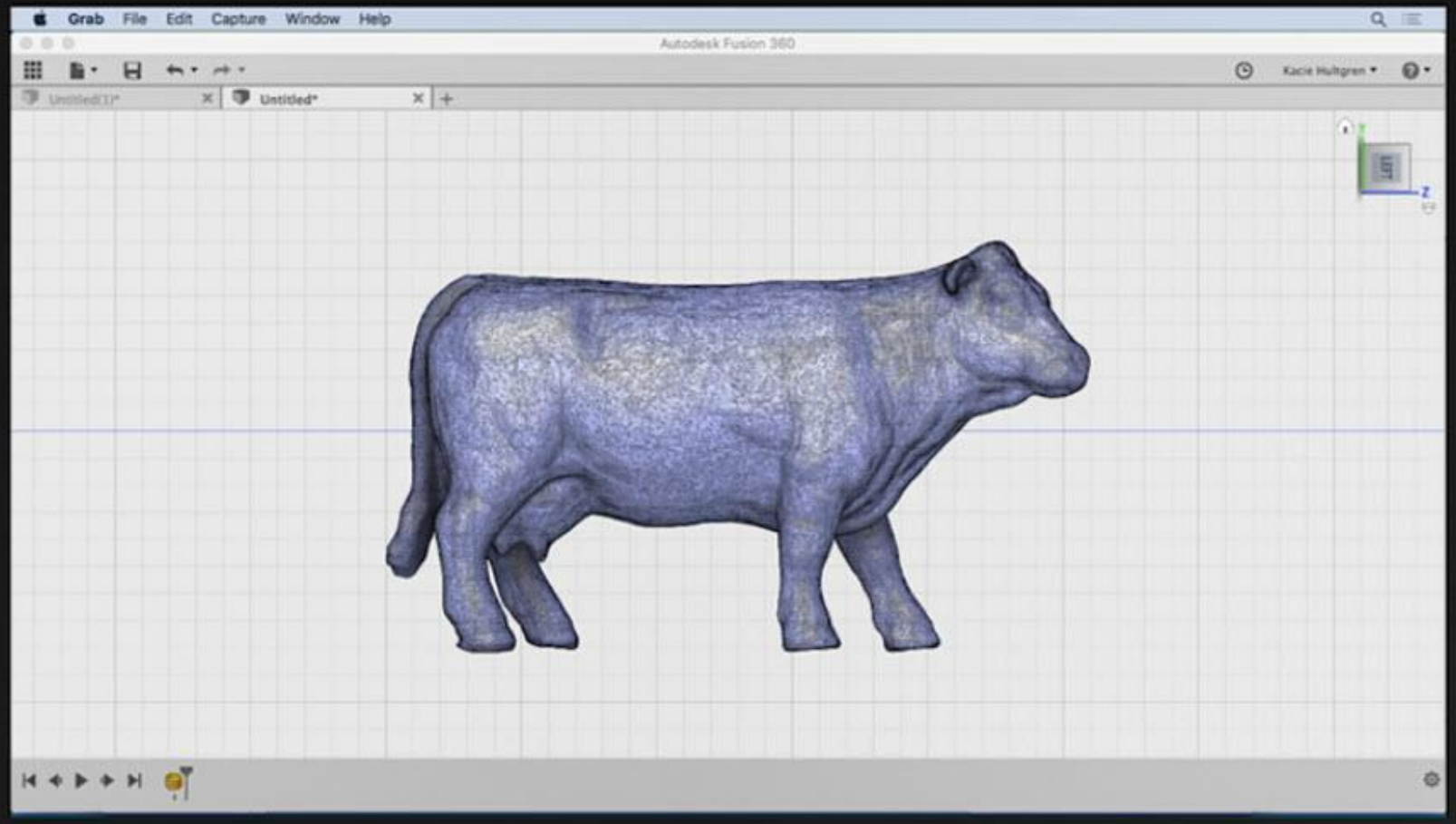
- Plan color placement in CAD
- STL files do not support color inherently
- Create with a separate form for each intended color and export separately
- Load into your slicer software and assign a different extruder to each form

Designing
Assemblies

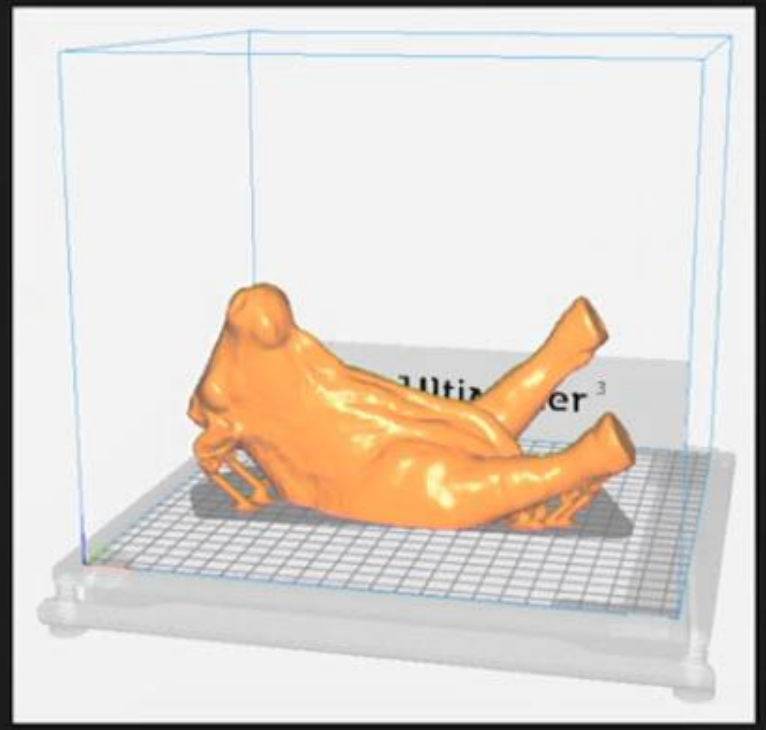
Assembly

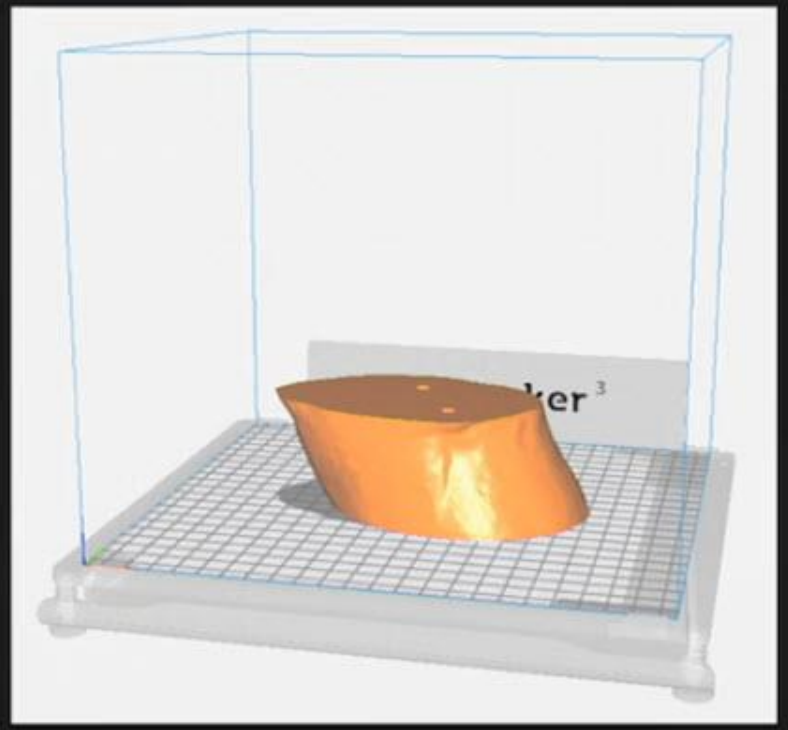
A collection of 3D parts that are put together to form a whole

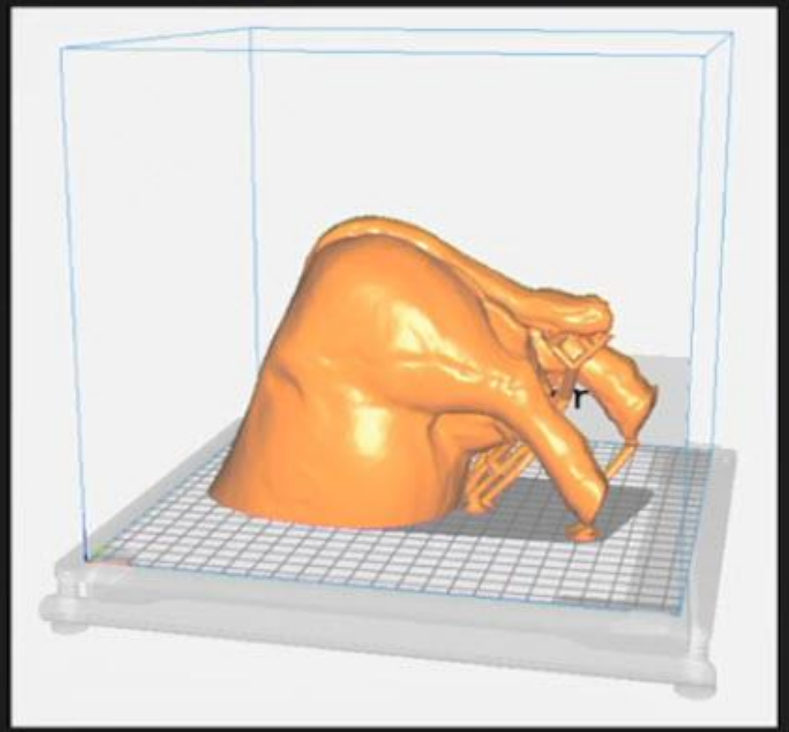
Cut It Up


Grab File Edit Capture Window Help
Autodesk Fusion 360
Kacie Hultgren
Untitled*

Cut It Up



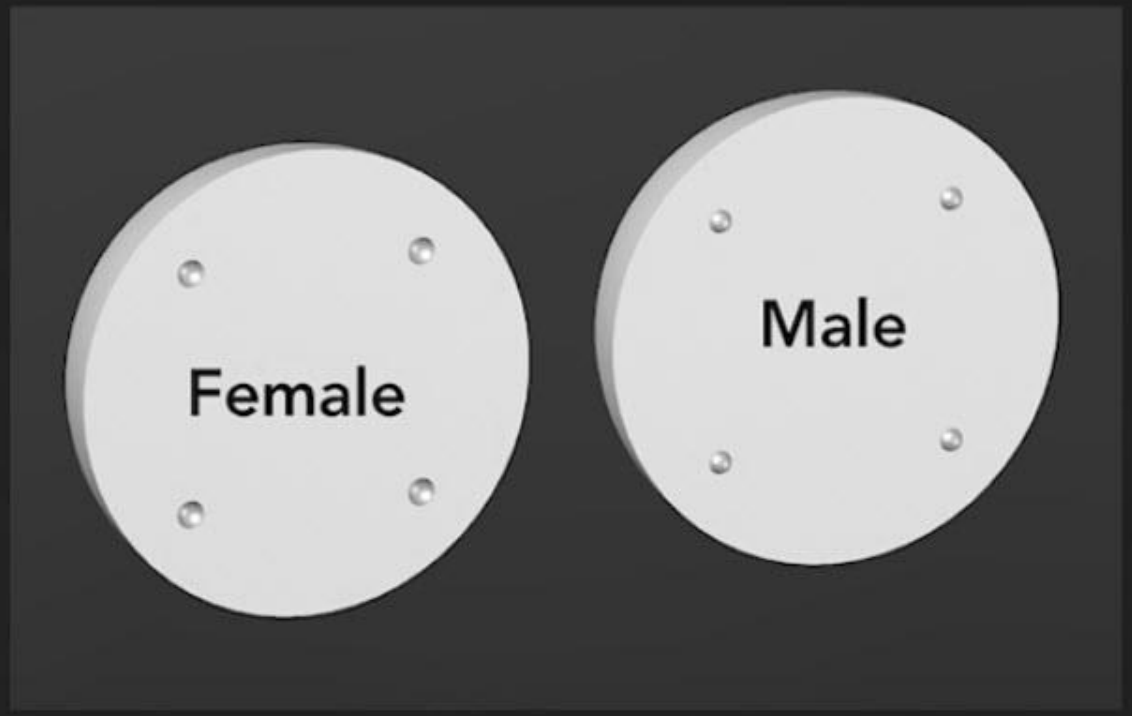


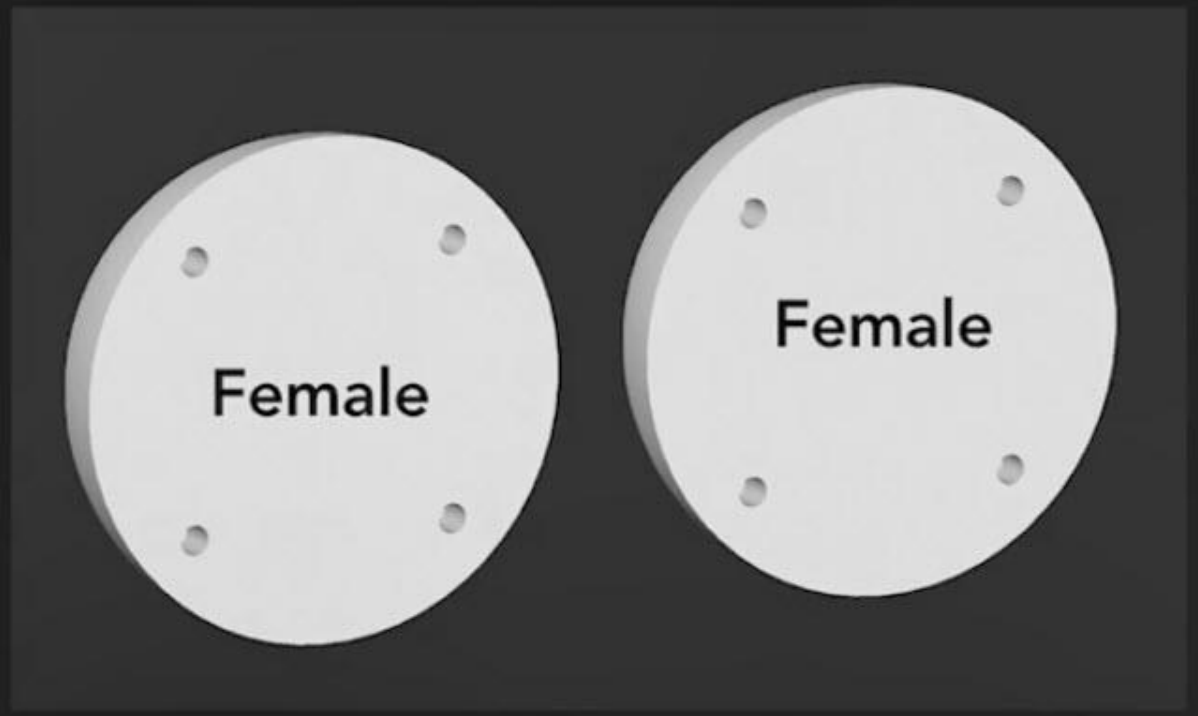


https://www.youtube.com/watch?v=oA7p_YQ_KoQ

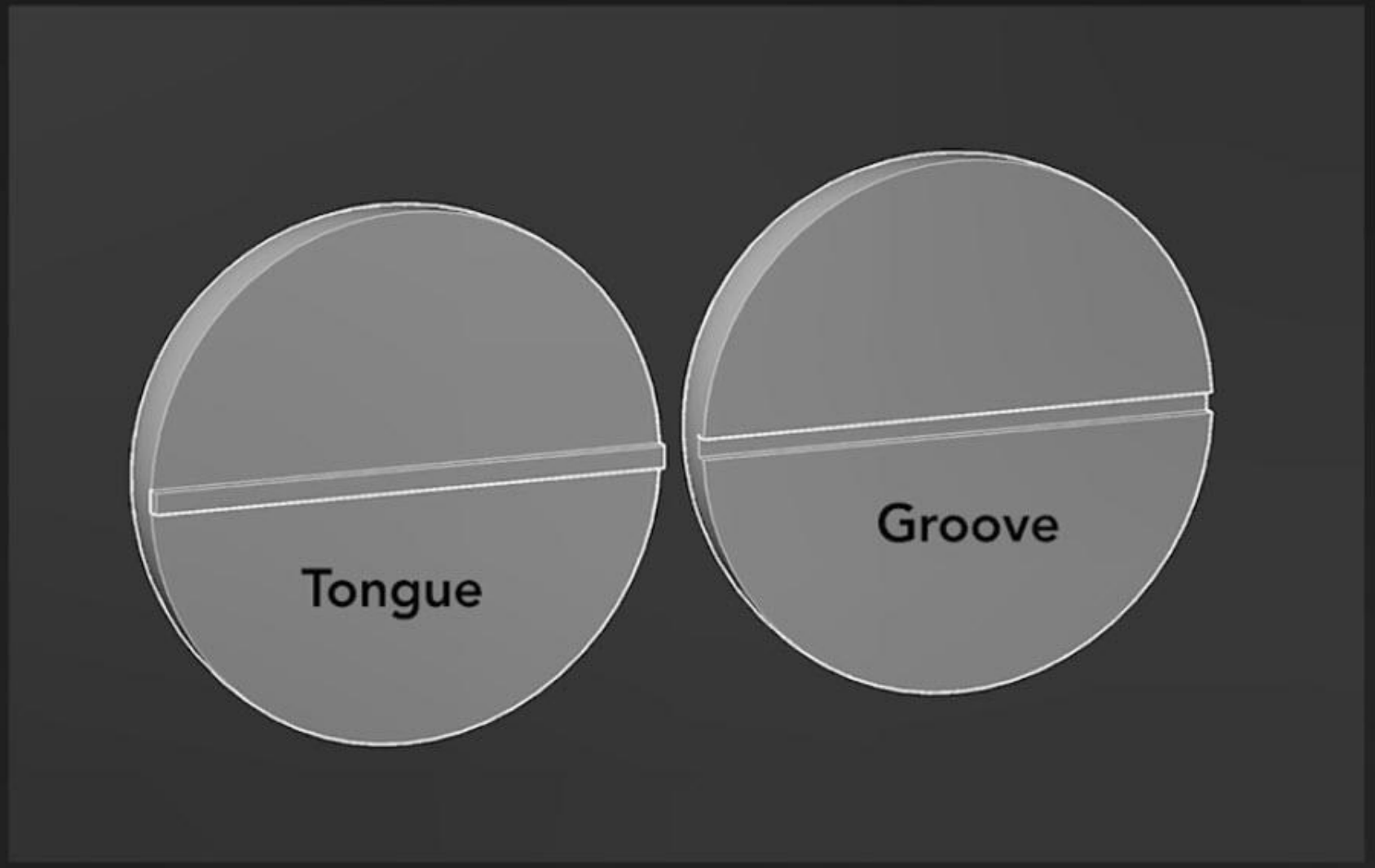
Placement Pins

- Placement pins, or locating pins, help you assemble your project accurately





Placement Pins



Adhesives

- Depends on thermoplastic
- Plastic glues recommended
- Solvent such as acetone

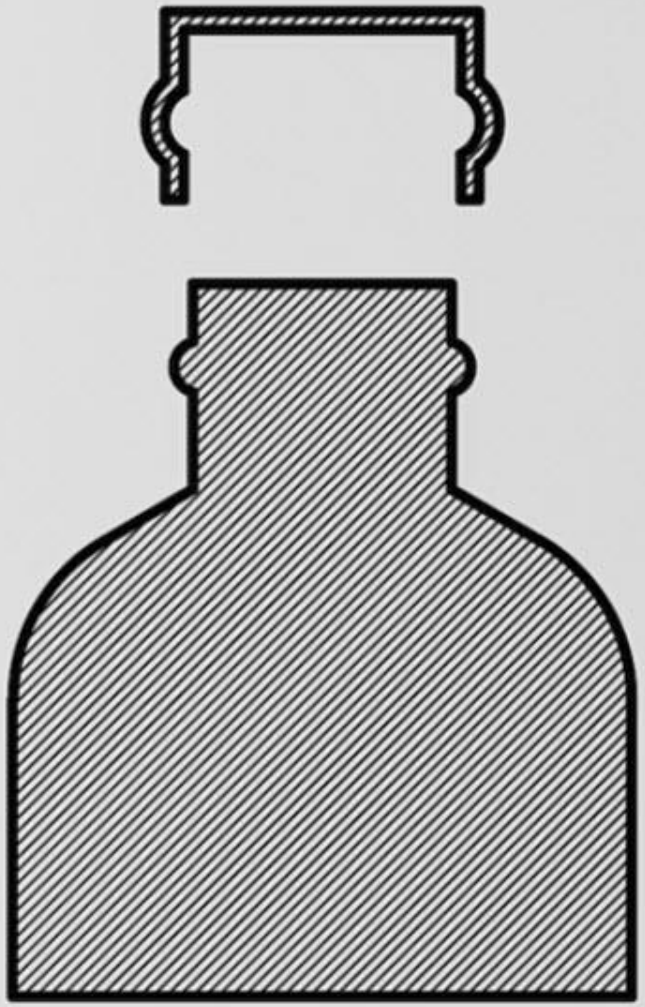
Engineering Fits

- Clearance: Hole is larger than the part
- Location: Hole is slightly smaller than the part
- Interference: Hole is smaller than the part

Snap Fits

Annular

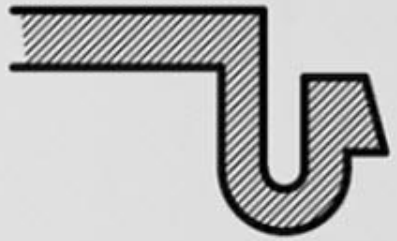
- Example: Pen cap that clicks into place
- Example: Bottle cap that snaps on
- Find the right amount of clearance
- Ball joints or clips



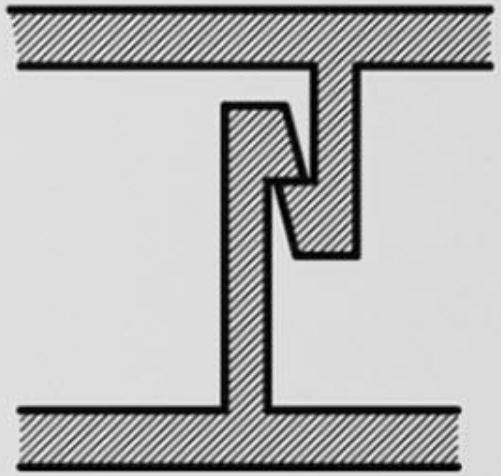
Snap Fits

Cantilever

- Two categories: L and U
- Be cognizant of flexibility
- Orient your part so the stress is perpendicular to the layer lines



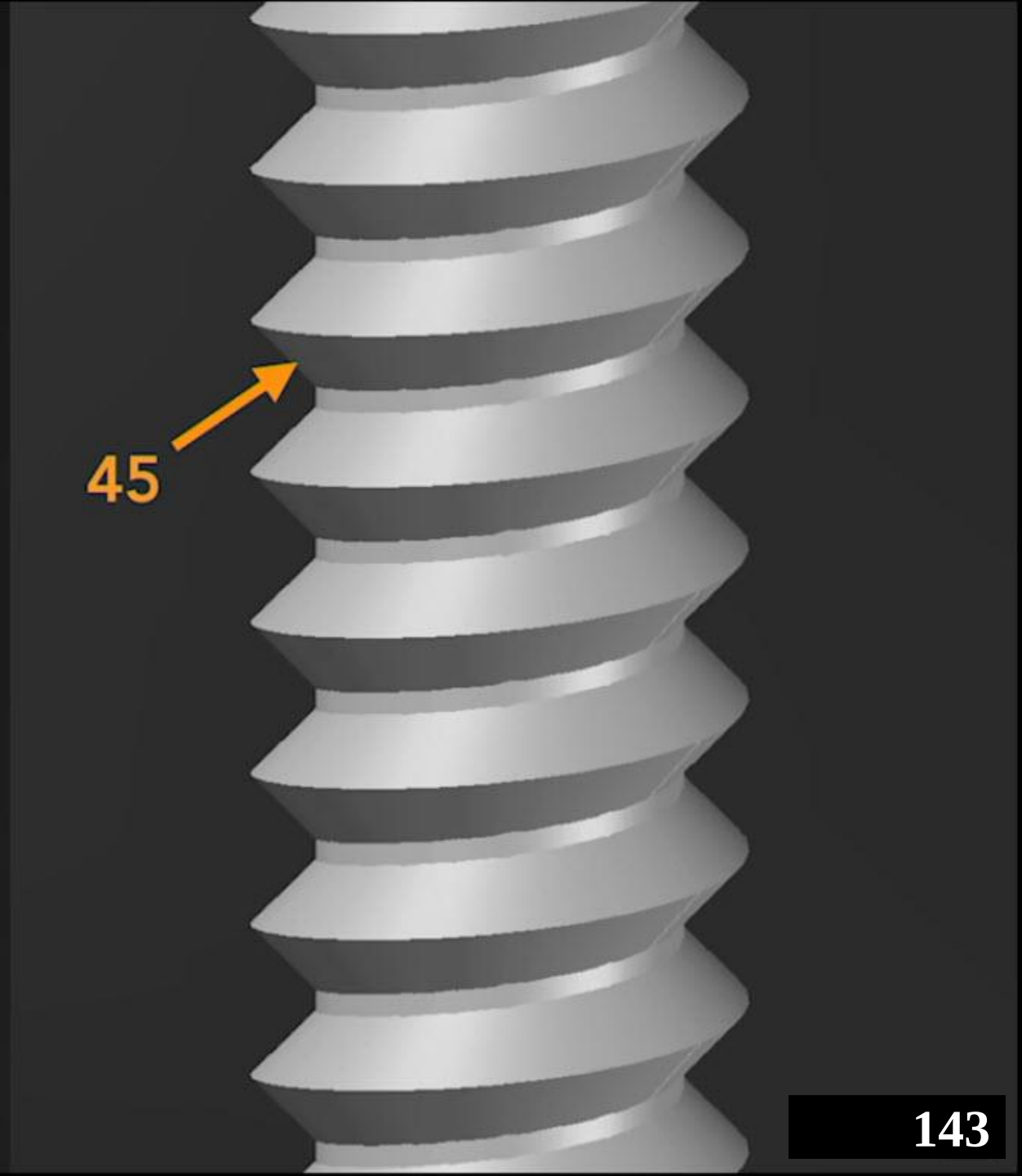
U Shape



L Shape

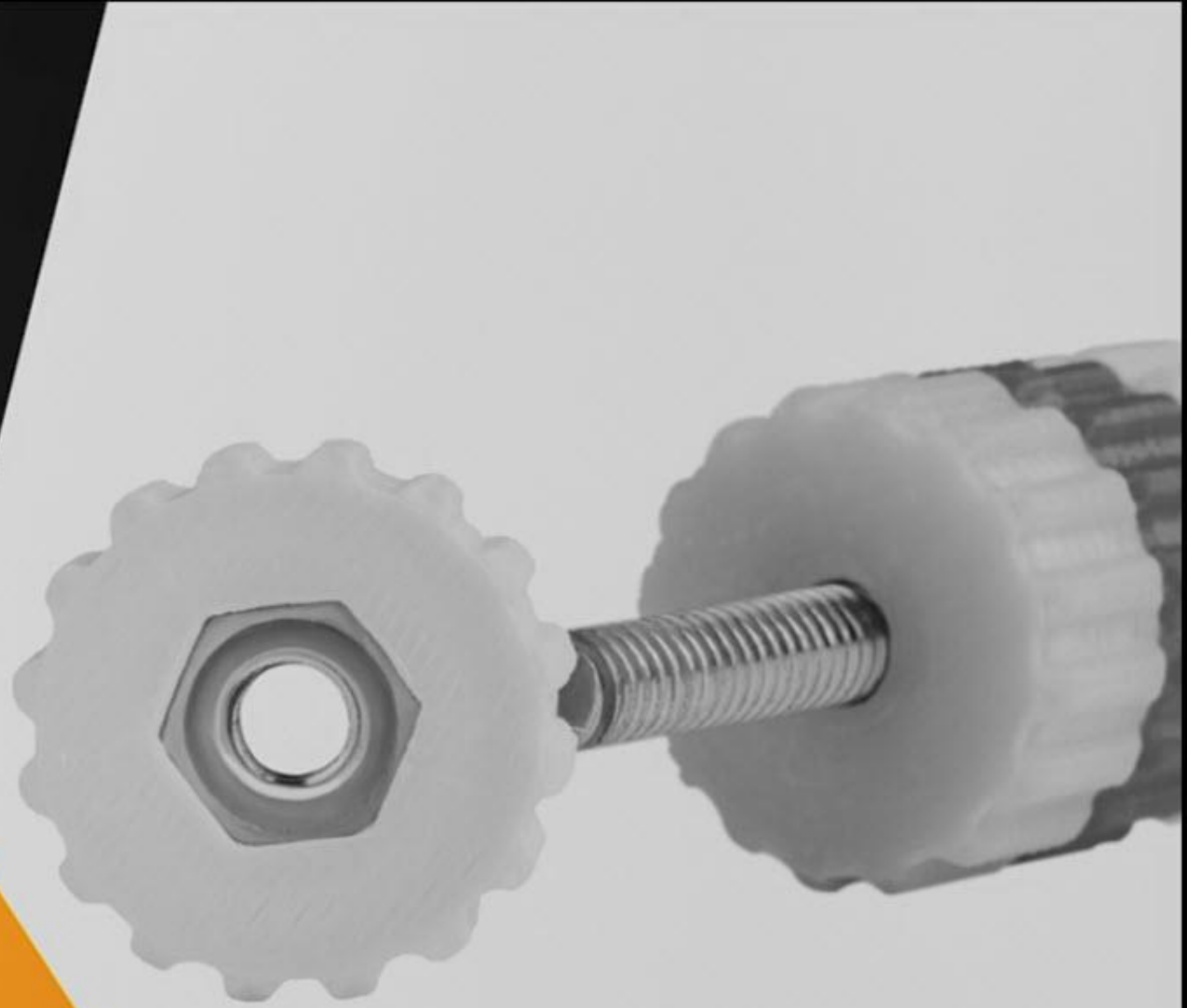
Threaded Parts

- Be mindful of the size and shape of the screw thread
- Don't exceed an angle of 45 degrees



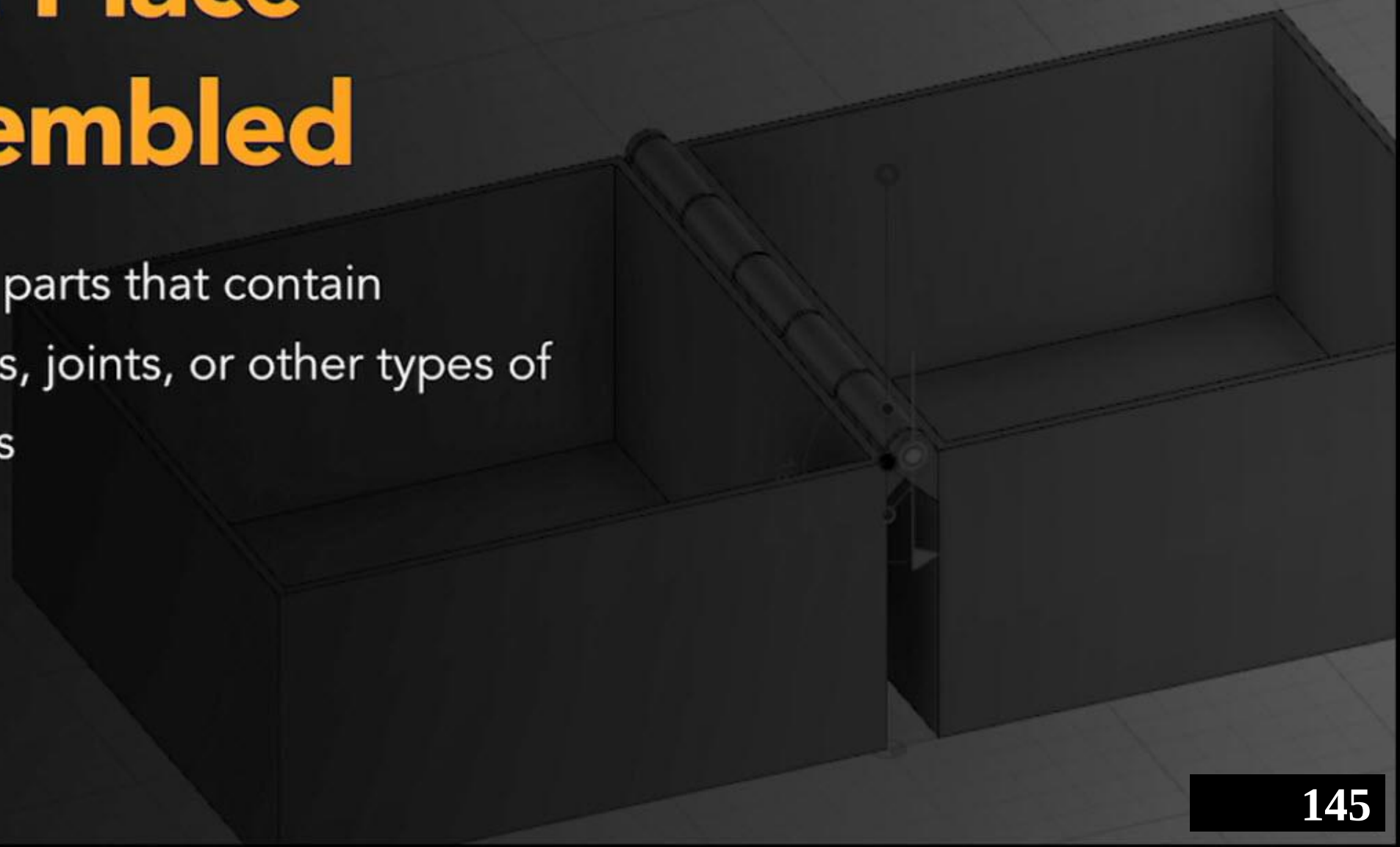
Incorporate Hardware

- Hardware set with heat shouldn't need clearance
- For glue, clearance is required



Print in Place Preassembled

FDM 3D printed parts that contain integrated hinges, joints, or other types of captured features



Strategies

- Pull parts down to the build plate
- Angle up at 45 degrees
- Leave clearance around moving parts
- Bridge over and through gaps