مقاله

بهبود دقت ابعادی در فرایند استریولیتوگرافی

فرید قدمی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران
mania.farid@gmail.com

صادق رحمتی
دانشیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی
srahmati2007@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۶/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۸/۶

چکیده

در دنیای امروز، حضور در عرصهٔ رقابت جهانی، بیش از هر چیز، مستلزم افزایش سرعت ساخت برای انطباق با تغییرات سریع بازار به‌همراه ارائهٔ محصولاتی با کیفیت بالاتر است. فناوری‌های نمونه‌سازی و ساخت سریع نیز در پاسخ به چنین نیازی ظهور و بروز پیدا کرده‌اند. استریولیتوگرافی،به‌عنوان یک فرایند چاپ سه‌بعدی، نخستین روش توسعه‌یافته در نمونه‌سازی سریع است. روش مذکور یک روش ساخت لایه به لایه است که در کمترین زمان ممکن قادر به تولید فرم‌های هندسی پیچیده‌ای است که تولید آنها با استفاده از روش‌های ماشینکاری متداول غیرممکن و یا بسیار وقت‌گیر است. با این‌همه، دقت ابعادی و استحکام فیزیکی نمونه‌های ساخته‌شده با استفاده از این روش، در مقایسه با روش‌های متداول ماشینکاری، هنوز به حد ایده‌آلی نرسیده است. این مقاله تلاش می‌کند با مرور، تحلیل و مقایسهٔ مهم‌ترین پژوهش‌هایی که تاکنون در این زمینه انجام شده است، مقادیر بهینهٔ پارامترهای تأثیرگذار در این فرایند را، به‌منظور بهبود دقت ابعادی در قطعات ساخته‌شده به روش استریولیتوگرافی، ارائه کند.

واژگان کلیدی: دقت ابعادی، نمونه‌سازی سریع، استریولیتوگرافی

مقدمه

نتایج تحقیقات دربارهٔ فناوری نمونه‌سازی سریع، نخستین‌بار در سال ۱۹۸۲ م منتشر و کاربرد صنعتی آن با سیستم استریولیتوگرافی[1] در سال ۱۹۸۹ م در ایالت کلیفورنیا آغاز شد [۱]. همان‌طور که از نام نمونه‌سازی سریع برمی‌آید، تأکید این روش بر سرعت در ساخت نمونه‌هایی است که به‌منظور دید طراحی و تست به‌کار می‌روند، اگرچه امروزهاین روش کاربردی‌تر شده و به مرزهای ساخت سریع نیز رسیده است [۲ – ۳]. استریولیتوگرافی، به‌عنوان یک فرایند چاپ سه‌بعدی، نخستین روش توسعه‌یافته در نمونه‌سازی سریع است که به‌کمک آن می‌توان مستقیماً از مدل سه‌بعدی کامپیوتری به یک مدل رزینی رسید. در فرایند استریولیتوگرافی اشعهٔ لیزر، که حرکت آن توسط کامپیوتر کنترل می‌شود، مقاطع مدل هندسی را روی سطح یک رزین مایع ترسیم می‌کند. این رزین مایع به نور

حساس است و بخش‌هایی از آن که در معرض تابش پرتو لیزر قرار دارد، به‌حالت جامد تبدیل می‌شود.

منابع تولید خطا در فرایند استریولیتوگرافی

خطای ابعادی در قطعاتی که به‌روش استریولیتوگرافی ساخته می‌شوند، یکی از مهم‌ترین عوامل بر سر راه توسعهٔ هرچه بیشتر این روش ساخت است. به‌طور کلی، خطای ایجادشده در فرایندهای نمونه‌سازی سریع را می‌توان به پنج عامل نسبت داد [۱ – ۴]:

۱. خطای ناشی از تبدیل فایل CAD به فایل STL: این خطا به‌خاطر تقریب‌زنی سطوح توسط المان‌های مثلثی است. با افزایش تعداد این المان‌ها خطا کمتر، اما زمان ساخت و حجم فایل STL بیشتر می‌شود.

۲. خطای ناشی از پهنای اشعهٔ لیزر: برای ترسیم دقیق مرزها، اشعهٔ لیزر بایستی به اندازهٔ نصف پهنای آن به‌سمت داخل قطعه آفست شود، اما پهنای اشعهٔ لیزر در همهٔ ماشین‌ها یکسان نیست، حتی برای یک ماشین در زمان‌های مختلف ممکن است متفاوت باشد.

۳. خطای ناشی از انقباض مادهٔ رزین: در اثر بسپارش یا پلیمرسازی[۲] چگالی ماده افزایش و حجم آن کاهش می‌یابد. رزین‌های اکریلیتی در حدود ۵ تا ۷ درصد انقباض حجمی دارند که این انقباض لطمهٔ زیادی به دقت ابعادی قطعه خواهد زد.

۴. پارامترهای تنظیمی[۳] ماشین RP: تنظیم این پارامترها، که توسط کاربر انتخاب می‌شوند، مهم‌ترین فاکتور قابل کنترل در کیفیت و دقت ابعادی قطعه است. انتخاب تنظیم‌های متفاوت نتایج کاملاً متفاوتی را در بر خواهد داشت.

۵. خطای پس‌پردازش: این خطا شامل سه بخش پیرایش، پخت نهایی و پرداخت قطعه است.

در میان منابع تولید خطای فوق، مشکل مربوط به خطای تقریب‌زنی فایل STL با فایل‌های جدیدتر SLC، که در سال ۱۹۹۲ م توسط شرکت تری دی سیستمز[۴] معرفی شد، رفع شده است. در مورد خطای ناشی از پهنای اشعهٔ لیزر، مقادیر جبران این پهنا امروزه به‌شکل نرم‌افزاری در دسترس کاربران بوده و تا حد زیادی این مشکل نیز رفع شده است. خطای ناشی از انقباض ماده‌ی رزین‌های اکریلیک نیز تا حد مطلوبی توسط رزین‌های اپوکسی[۵] که با همکاری تری دی سیستمز و یک شرکت دیگر[۶] در سال ۱۹۹۴ م معرفی شد، برطرف شده است. این رزین‌ها که XB5170 نام گرفتند، ۲ تا ۳ درصد انقباض حجمی دارند. شیوهٔ هاشورزنی جدید ACES[۷] نیز که به‌همراه این رزین‌ها معرفی شد، تا حد زیادی مشکلات مربوط به خطای ناشی از پخت نهایی را کاهش داده است [۴ – ۵] پس، آنچه در مطالعات امروز مهم است و باید مورد توجه قرار گیرد، بهینه‌کردن پارامترهای مربوط به زمان ساخت و تنظیم ماشین است که به آنها به اختصار پارامترهای فرایند می‌گویند.

نقش پارامترهای فرایند در دقت ابعادی

پارامترهای متعددی در شکل‌گیری واپیچش ناشی از تنش‌های ایجادشده در قطعه در طول فرایند مؤثرند، که از آن میان می‌توان به ضخامت لایه، مکث Z، پریود جاروب‌کردن، فاصلهٔ هاشوری، عمق نفوذ هاشور، شیوهٔ هاشورزنی، جهت قرارگیری قطعه، گپ تیغه، سرعت و شتاب فروروی، سرعت اسکن و جز این‌ها اشاره کرد. محققان، بسته به روش‌ها و آزمایشات خود برخی از این پارامترها را دارای ضریب تأثیر بیشتری دانسته، آنها را انتخاب کرده‌اند و به بررسی روابط پیچیده و غیرخطی این پارامترها پرداخته‌اند.

در ادامه هر یک از این پارامترها را تشریح خواهیم کرد.

ضخامت لایه

ضخامت لایه[۸]، عمق لایه‌ای است که توسط تابش لیزر جامد می‌شود و می‌توان به صراحت اذعان داشت که

براساس اغلب تحقیقات انجام‌شده در فرایند استریولیتوگرافی، ضخامت لایه مهم‌ترین پارامتر تعیین‌کننده در دقت ابعادی قطعهٔ ساخته‌شده است. براساس نظریهٔ ژاکوب [۶] هرچه ضخامت لایه کوچک‌تر باشد، تابش لیزر نیز کم‌تر است و بنابراین، انقباض کمتر و دقت ابعادی بهتر خواهد بود. عامل محدودکننده در انتخاب ضخامت لایهٔ کوچک‌تر، سرعت ساخت است. هرچه ضخامت لایه کوچک‌تر باشد، زمان ساخت و به‌دنبال آن، هزینهٔ ساخت بیشتر خواهد بود. ضخامت‌های لایهٔ نسبتاً متداول در صنعت از این قرارند: ۵۰، ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵، ۲۰۰، ۲۲۵ و ۲۵۰ میکرومتر. لی و همکارانش [۷] با استفاده از روش شبکهٔ عصبی مصنوعی[۹] به مدلسازی و تحلیل دقت ابعادی در فرایند استریولیتوگرافی پرداخته‌اند. آنها، در میان پارامترهای فرایند، سه پارامتر را اثرگذارتر از بقیه دانسته و به بررسی روابط آنها و میزان تأثیرشان بر دقت ابعادی قطعه پرداختند. این سه پارامتر، عبارت‌اند از: ضخامت لایه، نفوذ پخت هاشور و فاصلهٔ هاشوری. مطالعات آنها نشان داد که برای دستیابی به دقت ابعادی بیشتر، ضخامت لایهٔ کوچک، نفوذ پخت هاشور کم و فاصلهٔ هاشوری زیاد مناسب است. این نتایج مؤید تئوری ژاکوب نیز است. راجو و همکارانش [۸] نشان داده‌اند که در میان ضخامت‌های لایه‌ای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومتری، ضخامت لایهٔ ۱۰۰ میکرومتر برای رسیدن به مقدار بهینهٔ دقت ابعادی، خصوصیات مکانیکی و هزینهٔ ساخت بهترین ضخامت لایهٔ قابل انتخاب است. ژو و همکارانش [۴] در مطالعه‌ای به‌منظور بهینه‌سازی پارامترهای فرایند ساخت در SLA با طراحی آزمایش‌هایی به روش تاگوچی نشان دادند که در جهت، هندسه و سطوح مختلف، نسبت تأثیرگذاری پارامترها فرق می‌کند؛ اما با توجه به نتایج آنها، می‌توان مشاهده کرد که به‌طور کلی، مهم‌ترین عامل در دقت ابعادی قطعهٔ ساخته‌شده به‌روش SLA ضخامت لایه است که بهتر است کم باشد. پس از آن، نفوذ پخت هاشور و گپ تیغه، به‌ترتیب، از تأثیرگذاری بیشتری برخوردارند. اونو و همکارانش [۹] نیز در تحقیقی تجربی و با تکیه بر روش‌های آماری روی قطعات ساخته‌شده از رزین‌های اکریلیک، با استفاده از روشی جدید برای هاشورزنی، ضخامت لایهٔ ۱۹۰ میکرونی را پیشنهاد دادند، که هم دقت ابعادی خوبی درپی خواهد داشت، هم زمان ساخت را در مقایسه با ضخامت لایهٔ ۲۵۰ میکرونی کاهش خواهد داد.

نفوذ پخت هاشور

نفوذ پخت هاشور[۱۰] عمقی است که یک نوار پخته‌شده به لایهٔ پایین‌تر از خود، که قبلاً جامد شده، نفوذ می‌کند. نفوذ پخت هاشور در واقع لایه‌های همجوار را به‌هم پیوند می‌دهد. براساس نظریهٔ ژاکوب، که پیش از این اشاره شد، هرچه مقدار نفوذ پخت هاشور کمتر باشد، تابش لیزر نیز کم‌تر و بنابراین، انقباض کمتر و دقت ابعادی بهتر خواهد بود. اما اگرچه، عمق پخت هاشور کم، به‌خاطر کاهش مقدار تابش لیزر، به‌دقت ابعادی بهتری منجر می‌شود، اما میزان تابش باید به‌حدی باشد که بتواند لایه‌ها را به‌یکدیگر پیوند دهد و از استحکام قطعه نکاهد. بنابراین، انتخاب عمق نفوذ پخت هاشور بایستی بهینه باشد. لی و همکارانش [۷] نشان دادند که حالت بهینه آن است که تابش لیزر، نه اشباع باشد و نه ناکافی. اگر نفوذ پخت هاشور بیش از حد بهینه باشد، تابش لیزر به‌حد اشباع رسیده، دقت ابعادی کاهش خواهد یافت. اگر هم کمتر از حد بهینه باشد، عدم اتصال لایه‌های همجوار را درپی خواهد داشت که این حالت نیز مطلوب نیست. ژو و همکارانش [۴] نشان داده‌اند که نفوذ پخت هاشور پس از ضخامت لایه، مهم‌ترین عامل در دقت ابعادی است و مقدار کمتر آن به دقت ابعادی بیشتری منجر خواهد شد.

فاصلهٔ هاشوری

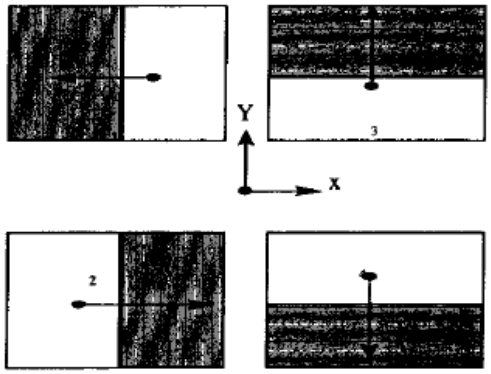
فاصلهٔ هاشوری (h_s) فاصلهٔ بین بردارهای خطوط هاشور است، که توسط لیزر روی رزین مایع اسکن می‌شوند. فاصلهٔ هاشوری، برای رسیدن به دقت ابعادی بالا، بهتر

است بیشتر باشد تا نوارهای هاشور روی هم نیفتند و موجب افزایش مقدار جذب تابش نشوند؛ اما این فاصله نباید از حدی تجاوز کند، زیرا ممکن است جامدسازی کامل نشود و احتیاج به پخت دوباره شود، که این خود باعث کاهش دقت ابعادی قطعه خواهد شد. لی و همکارانش [۷] نشان دادند که مقادیر متوسط تا بزرگ فاصلهٔ هاشوری مطلوب است، تا هم مقدار جذب تابش بر اثر افتادن لایه‌ها روی یکدیگر بیشتر نشود، هم نیازی به پخت مجدد نشود. هورتون و همکارانش [۱۰] نیز در مطالعه‌ای به‌منظور تعیین اثر پارامترهای فرایند بر دقت ابعادی و ایجاد واپیچش در نمونهٔ ساخته‌شده به‌روش استریولیتوگرافی، دریافتند که فاصلهٔ هاشوری مهم‌ترین عامل اثرگذار بر واپیچش نمونهٔ ساخته‌شده به‌روش استریولیتوگرافی است. مشاهدات آنها همچنین نشان داد که بدون استفاده از عمق پخت کامل نمی‌توان به دقت ابعادی مطلوبی رسید.

روش هاشورزنی

هاشورزنی روشی ساده برای جامدسازی قسمت‌های محصور بین مرزها در قطعه است. خطوط هاشور، بردارهای اسکن‌شده توسط لیزر هستند که به‌خاطر محدودبودن قطر پرتو لیزر پهنای بسیار کوچکی دارند.

روش‌های Tri-Hatch و Weave از نخستین روش‌های هاشورزنی بوده‌اند که امروز منسوخ شده‌اند؛ روش‌های جدید عمدتاً بر روش هاشورزنی Star-Weave استوارند، اما در مواردی، با تکیه بر هندسه و لایه‌بندی خاص قطعه روش‌های هاشورزنی، به تغییراتی در استراتژی هاشورزنی روی آورده‌اند. روش Divergent STAR-WEAVE که توسط اونو و همکارانش [۹] توسعه داده شده، بر نتایج تحقیقات کونیگ و همکارانش [۱۱] استوار است، مبنی بر اینکه چون نیروهای انقباضی عمدتاً در مسیر هاشورزنی اتفاق می‌افتد، بنابراین تابش متناوب روی لایه‌ها به ساختار همگن‌تری از تنش‌های پسماند منجر می‌شود که این خود افزایش دقت ابعادی را درپی خواهد داشت. به همین جهت، در این روش، همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، هاشورزنی از وسط قطعه آغاز می‌شود، به‌گونه‌ای‌که ابتدا از وسط قطعه تا انتهای یک طرف و سپس از وسط قطعه تا انتهای طرف دیگر هاشور می‌خورد. این روند در هر دو جهت x و y، مشابه روش START-WEAVE، انجام می‌شود.

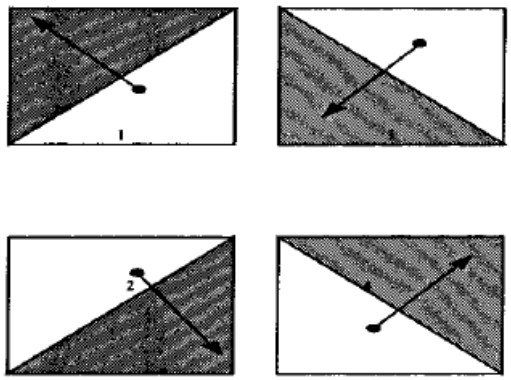


شکل ۱. هاشورزنی به‌روش Divergent STAR-WEAVE [۹]

روش Diagonal Divergent STAR-WEAVE، در واقع روش اصلاح‌شدهٔ Divergent STAR-WEAVE است، که این روش هم توسط اونو و همکارانش [۹] توسعه داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در این روش هاشورزنی، خطوط اسکن‌شده از خطوطی با زاویه‌های ۴۵ درجه نسبت به محورهای x و y تشکیل شده است. اونو و همکارانش [۹] نشان داده‌اند که در ضخامت لایهٔ ۱۹۰ میکرونی این روش و پس از آن روش Divergent STAR-WEAVE نسبت به روش STAR-WEAVE از پیچش کمتر و صافی سطح بالاتری برخوردارند. بنابه نتایج تجربی آنها، بهترین روش هاشورزنی برای ضخامت‌های لایهٔ ۲۵۰ و ۱۲۵ میکرون همان روش STAR-WEAVE است، در مقایسه با این دو روش جدید.

روش Circular STAR-WEAVE، که توسط نصوحی و رحمتی [۱۲] توسعه داده شده، بر این واقعیت استوار است

که هرچه تنش انقباضی، توزیع یکنواخت‌تری در قطعه داشته باشد، کرنش‌های انقباضی و در نتیجه خطای ابعادی کاهش می‌یابد. در این روش، مسیرهای x و y در روش هاشورزنی STAR-WEAVE به‌ترتیب با مسیرهای حلقوی شعاعی جایگزین شده‌اند. هاشورزنی حلقوی منجر به اتصال لایه‌ها نمی‌شود و بنابراین تنشی در قطعه ایجاد نمی‌شود. سپس هاشورزنی شعاعی لایهٔ جدید را به لایهٔ قبلی متصل می‌کند. همچنین در این روش، جهت هاشورزنی شعاعی نیز یک در میان تغییر می‌کند؛ در یک لایه از مرکز به‌طرف بیرون و در لایهٔ بعدی از بیرون به طرف مرکز. قطعاتی که در شرایط مشابه با این روش ساخته می‌شوند، نسبت به هاشورزنی STAR-WEAVE به دقت ابعادی بیشتری می‌رسند.



شکل ۲. هاشورزنی به‌روش
Diagonal Divergent STAR-WEAVE [۹]

نتایج

خطای ایجادشده در ابعاد نمونه‌های ساخته‌شده با فرایند استریولیتوگرافی را می‌توان به‌طور کلی به این پنج عامل نسبت داد: خطای ناشی از تبدیل فایل CAD به فایل STL، خطای ناشی از پهنای اشعهٔ لیزر، خطای ناشی از انقباض مادهٔ رزین، پارامترهای تنظیم ماشین RP، خطای پس‌پردازش.از میان منابع تولید خطای فوق، امروزه عامل پارامترهای تنظیم ماشین مهم‌ترین و کنترل‌پذیرترین عامل تولید خطای ابعادی است، که خود شامل بیش از ۲۰ پارامتر متنوع است که با یکدیگر روابط پیچیدهٔ غیرخطی دارند. از میان پارامترهای تنظیم ماشین (پارامترهای فرایند)، سه پارامتر نقش بسیار مهمی در دقت ابعادی نمونهٔ ساخته‌شده به روش استریولیتوگرافی دارند: ضخامت لایه، عمق پخت هاشور، فاصلهٔ هاشوری.

ضخامت لایه هرچه کمتر باشد، دقت ابعادی بهتر، اما زمان و هزینهٔ ساخت افزایش می‌یابد. عمق پخت هاشور کم، به‌خاطر کاهش مقدار تابش لیزر، به دقت ابعادی بهتری منجر می‌شود، اما میزان تابش باید به‌حدی باشد که لایه‌های همجوار را به یکدیگر پیوند دهد. فاصلهٔ هاشوری، برای رسیدن به دقت ابعادی بالا، بهتر است بیشتر باشد، تا نوارهای هاشور روی هم نیفتاده و موجب افزایش مقدار جذب تابش نشوند، اما این فاصله نباید از حدی تجاوز کند، زیرا آنگاه ممکن است جامدسازی کامل نشده و احتیاج به پخت دوباره شود که این خود سبب کاهش دقت ابعادی خواهد شد. نیروهای انقباضی عمدتاً در مسیر هاشورزنی اتفاق می‌افتد؛ بنابراین، تابش‌های متناوب و کوتاه‌تر لیزر روی لایه‌ها به ساختار همگن‌تری از تنش‌های پسماند منجر می‌شود، که این امر سبب افزایش دقت ابعادی خواهد شد.

مآخذ

[۱] رحمتی، صادق، مجتبی سلیمی، محمد ایلدارژاله. *فناوری نمونه‌سازی سریع*، تهران: جهان جام جم، ۱۳۸۴.

[2] Patri K. Venuvinod, Weiyin Ma, *Rapid Prototyping, Laser-based and Other Technologies*, Kluwer Academic Publishers, 2004.

[3] Dilip Sahebrao Ingole, Abhay Madhusudan Kuthe, Shashank B. Thakare, Amol S. Talankare, "Rapid Prototyping: a Technology Transfer Approach for Development of Rapid Tooling", *Rapid Prototyping Journal*, Volume 15. Number 4, 2009, pp. 280-290.

[4] Jack G. Zhou, Daniel Herscovici, Calvin C. Chen, "Parametric Process Optimization to Improve the Accuracy of Rapid Prototyped Stereolithography Parts" *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, No.40, pp.1-17.

[5] Pang, Thomas H. "Stereolithography Epoxy Resin Development: Accuracy and Dimensional Stability", 3D Systems Inc. 1994.

[6] Jacobs, P. F. "Rapid Prototyping and Manufacturing", Society of Manufacturing Engineers, 1992.

[7] S. H. Lee, W. S. Park, H. S. Cho, W. Zhang, M. C. Leu, "A Neural Network Approach to the Modelling and Analysis of Stereo lithography Process". *Proc Instn Mech Engrs*, 2001, Vol. 215, Part B.

[8] Raju. B. S, Chandrashekar, U., Drakshayani. D. N. and Chockalingam. K., "Determining the Influence of Layer Thickness for Rapid Prototyping with Stereolithography (SLA) Process", *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2(7), 2010, pp. 3199-3205.

[9] S. O. Onuh, K. k. B. Hon, "Improving Stereolithography Part Accuracy for Industrial Applications", *Springer-Verlag London Limited*, 2001.

[10] Leslie Horton, Edward Gargiulo, Michael Keefe, "An Experimental Study of the Parameters Affecting Curl in Parts Created Using Stereolithography"

[11] W. Konig, L. Celi and S. T. Nokan, "Stereolithography Process Technology", *Proceeding 3rd European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, 1994, pp. 191-208.

[12] R. Nosouhi, S. Rahmati, "Finite Element Analysis of Shrinkage Phenomena in Stereolithography and Development of a New Hatching Method", *10th Iranian Conference on Manufacturing Engineering*, 2010.

پی‌نوشت

1. stereolithography
2. polymerization
3. setup
4. 3D Systems, http://www.3dsystems.com (accessed Nov 1, 2013)
5. epoxy
6. Ciba Geigy
7. Accurate, Clear, Epoxy, Solid
8. layer thickness (l_t)
9. artificial neural network
10. hatch overcure (h_o)