

اثر بار جانبی ابزار با لبه‌های مارپیچ در فرایند فرزکاری

محمد کاظمی نصرآبادی

استادیار دانشکده هوافضا

دانشگاه هوایی شهید ستاری

m_nasr1350@yahoo.com

علی نوری*

استادیار دانشکده هوافضا

دانشگاه هوایی شهید ستاری

ali_nori@iust.ac.ir

علی جعفری

دانشجوی کارشناسی ارشد

دانشگاه هوایی شهید ستاری

ali_mech2002@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۲۲

چکیده

امروزه فرایند فرزکاری به یکی از متداول‌ترین و پرکاربردترین روش‌های تولید مبدل شده است. از جمله شاخص‌های برتری فرایند فرزکاری می‌توان به دقت بالا، هزینه کم، کاربرد آسان و قابلیت مناسب در تولید قطعاتی با شکل‌های متنوع و پیچیده اشاره کرد. یکی از نیازهای اساسی برای فرایند فرزکاری سرعت‌بالا پیش‌بینی نواحی برش پایدار است. در این مقاله، نخست با استفاده از آزمون‌های شیارتراشی ضرایب برشی برای آلیاژ آلومینیم AI-6061-T6 محاسبه می‌شود و پارامترهای مودال ابزار نیز با استفاده از تست مودال به دست می‌آید. سپس نتایج شبیه‌سازی اثر زاویه مارپیچ بر پایداری سیستم با استفاده از روش تحلیل المان محدود زمانی ارائه می‌شود. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی می‌توان اثر بار جانبی ابزار را در اندازه انشعاب هویف^۱ و حذف انشعاب فلیپ^۲ در فرایند فرزکاری مشخص کرد. در پایان، صحت نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با استفاده از مدل‌های ارائه‌شده توسط مآخذ معتبر مورد تأیید قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: فرزکاری، بار جانبی، پایداری، زاویه مارپیچ

۱. مقدمه

معمولاً به‌هنگام فرزکاری محیطی، ارتعاشات ناخواسته‌ای پدید می‌آید؛ نوسانات و ارتعاشاتی که کیفیت قطعه تمام‌شده و عمر ابزار - اسپیندل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین به‌منظور محدود نمودن این ارتعاشات، کاربر ناگزیر از انتخاب شرایط برشی مناسب است. نظریه دالان‌های پایداری امکان انتخاب شرایط برشی مناسب را ایجاد می‌کند [۱]. این نظریه مرز میان برش پایدار و برش ناپایدار را با رسم عمق برش محوری برحسب سرعت

اسپیندل مشخص می‌کند. در فرزکاری دو نوع ناپایداری تشخیص داده شده است که ارتعاشات خودبرانگیخته کلاسیک یا انشعاب هویف و دیگری انشعاب فلیپ ناشی از آثار ضربه‌ای هنگام ورود و خروج قطعه کار نامیده شده‌اند. انشعاب فلیپ پدیده‌ای است که اصولاً در فرزکاری سرعت‌بالا با بار جانبی کم اتفاق می‌افتد [۲]. در شکل ۱ دیاگرام دالان پایداری به‌همراه ناپایداری‌های انشعاب هویف و فلیپ نمایش داده شده است.

این ابزارها عموماً در شرایط عمق برش زیاد و عرض برش کم مورد استفاده قرار می‌گیرند. ماریچ روی لبه برنده سبب افزایش تدریجی بار براده در طول لبه می‌شود. اگر زاویه ماریچ ابزار برابر با β باشد، یک نقطه روی لبه ابزار دارای یک تأخیر زاویه‌ای نسبت به پایین‌ترین نقطه همان لبه خواهد بود. مقدار تأخیر زاویه‌ای ψ در عمق محوری z به صورت رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$\tan \beta = \frac{D\psi}{2z} \Rightarrow \psi = \frac{2z \tan \beta}{D} \quad (1)$$

به این ترتیب اگر موقعیت زاویه‌ای پایین‌ترین نقطه یک لبه از ابزار θ ، به عنوان مرجع زاویه انتخاب شود، نقطه‌ای در ارتفاع z روی همان لبه دارای موقعیت زاویه‌ای $(\theta - \psi)$ خواهد بود. در نتیجه ضخامت براده برداشته شده توسط نقاط گوناگون یک لبه متغیر خواهد بود. برای یک فرز انگشتی با زاویه ماریچ β ، مؤلفه نیروی برش در راستای x و y به صورت رابطه ۲ بیان می‌شود [۷]:

$$F_x(t) = \int_{z_1(t)}^{z_2(t)} dF_x(z, t) \quad (2)$$

$$F_y(t) = \int_{z_1(t)}^{z_2(t)} dF_y(z, t)$$

به طوری که در این روابط $dF_x(z, t)$ و $dF_y(z, t)$ به ترتیب نیروهای دیفرانسیلی روی المان لبه برشی در ارتفاع z و همچنین $z_1(t)$ و $z_2(t)$ مختصات z در نقاط شروع و انتهای درگیری لبه می‌باشند. نیروی برشی دیفرانسیلی dF_x و dF_y توسط روابط ۳ بیان می‌شوند:

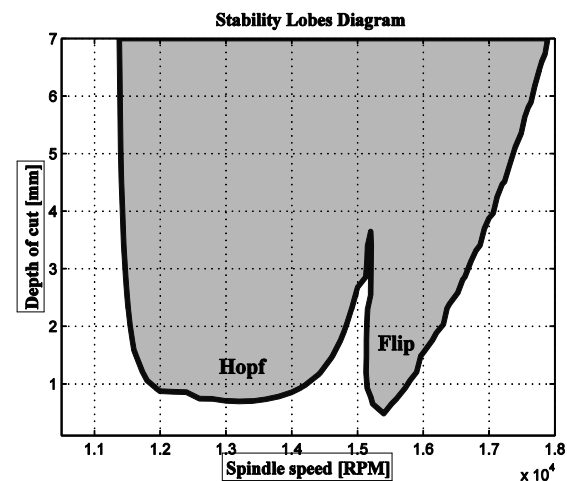
$$\begin{aligned} dF_x(z, t) &= -dF_t \cos \theta_p(z, t) \\ &\quad - dF_n \sin \theta_p(z, t) \\ dF_y(z, t) &= -dF_t \sin \theta_p(z, t) \\ &\quad - dF_n \cos \theta_p(z, t) \end{aligned} \quad (3)$$

به طوری که در این روابط dF_n و dF_t ، θ_p به صورت روابط ۴ و ۵ تعریف می‌شوند:

$$dF_n = g(z, t) K_n w(\theta(z, t)) dz \quad (4)$$

$$dF_t = g(z, t) K_t w(\theta(z, t)) dz \quad (5)$$

تحلیل پایداری در فرایند فرزکاری با استفاده از مدل‌های خطی و غیرخطی انجام می‌شود. به تازگی الیور و همکاران محاسبه دیاگرام دالان‌های پایداری با استفاده از مدل‌های خطی و غیرخطی را به طور جامع مقایسه کرده‌اند [۳]. با توجه به مرور مقاله‌های متنوع، یکی از بهترین و کارآمدترین روش‌ها برای تعیین پایداری روش آنالیز المان محدود زمانی^۳ است. در تحقیقات گذشته، برای سیستم‌های یک و دو درجه آزادی این روش در مورد ابزارهایی با زاویه ماریچ صفر درجه مورد استفاده قرار گرفته است. نقطه ضعف اصلی تحقیقات قبلی [۴، ۵ و ۶] این است که زاویه ماریچ صفر برای ابزارهای فرزکاری در نظر گرفته شده است، حال آنکه زاویه ماریچ استاندارد در صنعت ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه می‌باشد. از میان زاویه‌های فوق، زاویه ۳۰ درجه متداول‌تر است. در این مقاله، محدوده پایداری با استفاده از روش آنالیز المان محدود زمانی با در نظر گرفتن اثر زاویه ماریچ تعیین و اثر بار جانبی ابزار در اندازه انشعاب هویف و فلیپ در فرایند فرزکاری با استفاده از ابزار با لبه‌های ماریچ تعیین می‌گردد.



شکل ۱. دیاگرام دالان پایداری و انشعاب‌های هویف و فلیپ

۲. محاسبه نیروی برش برای لبه برنده ماریچ

به منظور کاهش تغییرات شدید مؤلفه‌های نوسانی نیروهای برشی از فرز انگشتی با لبه برنده ماریچی استفاده می‌شود.

تعیین می‌شود. مطالعه مشخصه‌های دینامیکی ابزار با استفاده از آزمایش مودال توسط مجموعه تست مودال B&K Pulse Model 3560D انجام شده است. مجموعه آزمایش مودال شامل یک وسیله تحریک، یک مبدل و یک تحلیلگر است. وسیله تحریک یا چکش مودال از نوع Endevco بوده، به منظور تحریک سازه به کار می‌رود که مقدار نیروی اعمال شده به ابزار را از طریق یک لودسل^۴ داخلی اندازه‌گیری می‌کند. مبدل، به منظور اندازه‌گیری پاسخ سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد و شتابسنج پیزوالکتریک مدل A/123/E952 ساخت شرکت دی. جی. برچال^۵ می‌باشد. همچنین از تحلیلگر ۳۲ کاناله پالس^۶ استفاده شده است.

۳-۱. محاسبه ضرایب نیروی برش

یک روش سریع برای تعیین ثابت‌های نیروی برش، انجام آزمایش و تعیین ضرایب برشی است. در این روش - که به روش ساختارگرا نیز معروف است - مجموعه‌ای از آزمایش‌ها تحت پیشروی‌های گوناگون اما میزان درگیری و عمق برش ثابت انجام می‌شود. سپس مقدار متوسط نیرو در هر پرید ابزار اندازه‌گیری و به منظور جلوگیری از اثر خطای خروج از مرکز ابزار روی اندازه‌گیری‌ها، کل نیرو در هر دور اسپیندل جمع و بر تعداد دندان‌های اسپیندل تقسیم می‌شود. سپس مقدار اندازه‌گیری شده نیروی متوسط از روش تجربی با رابطه نظری برابر قرار داده می‌شود و بدین ترتیب ثابت‌های نیروی برش به دست می‌آیند. در روش ساختارگرا آزمایش شیارزنی متداول است.

جدول ۱. شرایط ماشینکاری و تست‌های انجام شده جهت محاسبه ضرایب نیروی برشی

شماره آزمایش	عمق برش محوری برحسب میلی‌متر	عمق برش شعاعی برحسب میلی‌متر	بار براده ^۷ برحسب میلی‌متر بر دندان	سرعت اسپیندل برحسب دور بر دقیقه
۱	۴	۱۲	۰/۱	۳۵۰۰
۲	۴	۱۲	۰/۱۵۰۸۵	۳۵۰۰
۳	۴	۱۲	۰/۲۰۱۷۸	۳۵۰۰

$$\theta_p(z, t) = \Omega t - \left(\frac{2 \tan \beta}{D} \right) z \quad (6)$$

ضخامت براده نیز با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$w(z, t) = h \sin \theta_p(z, t) + [x(t) - x(t - \tau)] \sin \theta_p(z, t) + [y(t) - y(t - \tau)] \cos \theta_p(z, t) \quad (7)$$

و نهایتاً $K_c(t)$ و $f_c(t)$ اصلاح شده با گنجاندن اثر زاویه ماریچ به صورت رابطه ۸ بیان می‌شوند [۷]:

$$K_c(t) = \sum_{p=1}^N g_p(t) \int_{z_1(t)}^{z_2(t)} [K_t \sin \theta_p(t) \cos \theta_p(t) + K_n \sin \theta_p(t) \sin \theta_p(t)] dz \quad (8)$$

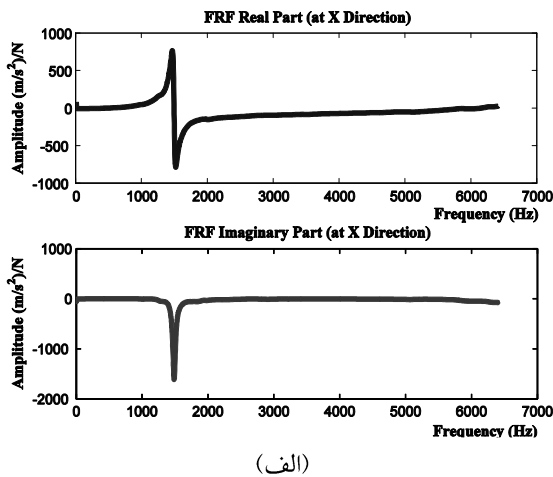
$$f_0(t) = \sum_{p=1}^N h g_p(t) \int_{z_1(t)}^{z_2(t)} [K_t \sin \theta_p(t) \cos \theta_p(t) + K_n \sin \theta_p(t) \sin \theta_p(t)] dz$$

۳. روش انجام آزمایش‌ها برای تعیین ثابت‌های

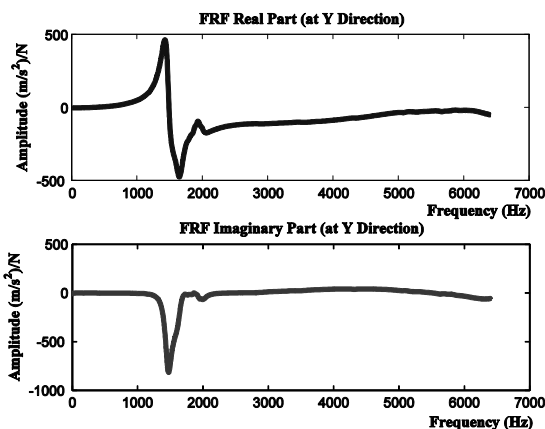
نیروی برش و پارامترهای مودال ابزار

آزمایش‌های فرزکاری با استفاده از دینامومتر پیزوالکتریک چندمؤلفه‌ای کیستلر 9255B اندازه‌گیری نیروهای فرزکاری انجام شده است. جهت انجام آزمایش، ابتدا دینامومتر دقیقاً تنظیم و روی میز ماشین ابزار ساعت می‌گردد. سپس با استفاده از وزنه‌های ۱۰ نیوتنی دینامومتر کالیبره می‌شود. پس از اطمینان از صحت عملکرد دینامومتر آزمایش را شروع می‌کنیم. نخست ضرایب نیروی برشی آلیاژ آلومینیوم Al6061-T6 مطابق شرایط ارائه شده در جدول ۱ تعیین می‌شود. سپس با انجام آزمایش‌های مودال روی فرز انگشتی دولبه از جنس فولاد تندبر پارامترهای مودال ابزار

۷۸ میلی‌متر می‌باشد. با استفاده از نمودار تابع پاسخ فرکانسی برای قسمت‌های حقیقی و موهومی مطابق شکل ۳ پارامترهای مودال ابزار به صورت جدول ۳ محاسبه شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳. نمودار تابع پاسخ فرکانسی
الف) در راستای x، ب) در راستای y

جدول ۳. پارامترهای مودال ابزار

راستای y	راستای x	
۱۴۷۵	۱۴۸۵	فرکانس (هرتز)
۰/۰۷۴۲۴	۰/۰۱۷۸۴	نسبت میرایی ^{۱۰} (درصد)
۷/۱۰۴×۱۰ ^۵	۱/۵۱۶×۱۰ ^۶	سختی ^{۱۱} (نیوتن بر متر)

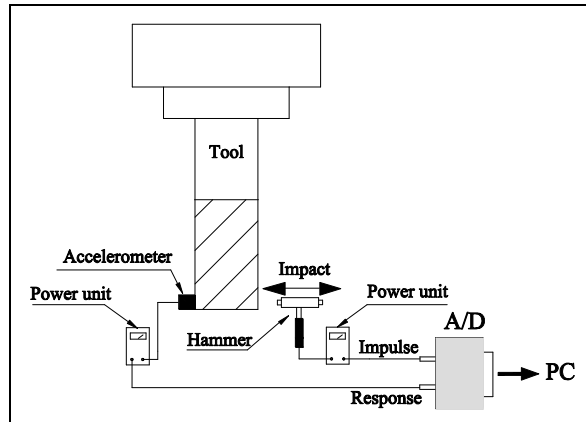
آزمایش‌های برشی توسط ابزار از جنس فولاد تندبر^۸ دوشیاره با مقدار طول بیرون‌آمدگی ابزار از کولت یا نگاه‌دارنده ابزار^۹ ۴۰ میلی‌متر برای مشخصات ارائه‌شده در جدول ۱ انجام شده است. با استفاده از رگرسیون خطی ضرایب نیروی برشی و لبه‌ای در راستای شعاعی و مماسی محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲. ضرایب برشی به دست آمده از آزمایش شیارزنی

پارامتر	واحد	مقدار
n	دور بر دقیقه	۳۵۰۰
K_{tc}	نیوتن بر میلی‌متر مربع	۵۵۲/۵۵۷
K_{rc}	نیوتن بر میلی‌متر مربع	۱۸۶/۶۴
K_{te}	نیوتن بر میلی‌متر	۱۹/۶۳
K_{re}	نیوتن بر میلی‌متر	۱۵/۷۶۷

۲-۳. پارامترهای مودال ابزار

در شکل ۲ نحوه انجام آزمایش مودال ابزار نمایش داده شده است.

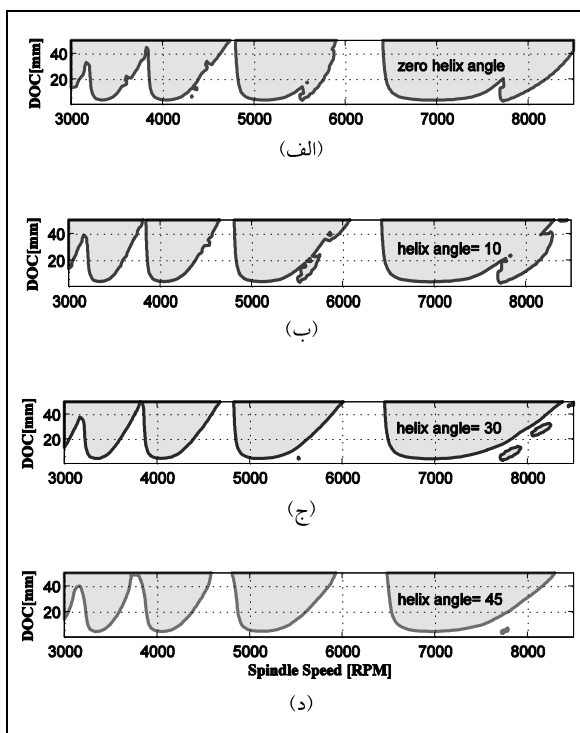


شکل ۲. نحوه انجام آزمایش مودال ابزار

در این مقاله به منظور اندازه‌گیری تابع پاسخ فرکانسی ابزار، ابتدا شتاب‌سنج در نوک ابزار و در جهت x قرار می‌گیرد سپس ابزار توسط چکش در جهت x تحریک می‌شود. همین عمل برای جهت y نیز تکرار شده است. ابزار مورد استفاده از جنس فولاد تندبر و به قطر ۱۲ میلی‌متر و تعداد دو لبه با طول بیرون‌آمدگی ابزار از کولت یا نگاه‌دارنده ابزار

۴. اثر زاویه مارپیچ

به منظور بررسی اثر زاویه مارپیچ در پایداری فرایند فرزکاری با بار جانبی کم حالت تأییدشده‌ای در فرایند فرزکاری یک درجه آزادی در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای دینامیکی ابزار، ضرایب برشی، قطر ابزار مطابق مرجع [۸] در جدول ۴ ارائه شده است. درگیری برای همه شبیه‌سازی‌ها ۵ درصد است. برای ماکزیمم عمق برش ۵۰ میلی‌متر و ماکزیمم زاویه مارپیچ ۴۵ درجه فقط یک لبه از مجموع دو لبه ابزار در برش درگیر شده است. نتایج در محدوده سرعت اسپیندل ۳۰۰۰ تا ۸۵۰۰ برای فرایند فرزکاری یک درجه آزادی با پارامترهای ارائه‌شده در جدول ۴ در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴. دالان‌های پایداری برای فرایند یک درجه آزادی با تغییر زاویه مارپیچ

با افزایش زاویه مارپیچ انشعاب فلیپ ابتدا به جزایر ناپایدار تبدیل می‌شود و با افزایش بیشتر در زاویه مارپیچ این جزایر از بین خواهند رفت که روند مشابهی توسط مرجع [۸] پیش‌بینی شده بود.

۵. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از پارامترهای

واقعی مورد استفاده در آزمایش‌ها

فرایند فرزکاری با استفاده از ضرایب نیروی برشی مطابق جدول ۲، پارامترهای مودال مطابق جدول ۳ و شرایط ماشینکاری داده‌شده در جدول ۵ برای فرایند فرزکاری با بار جانبی کم در حالت فرزکاری مخالف با استفاده از روش تحلیل المان محدود زمانی شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی برای زاویه‌های مارپیچ صفر، ۱۵ و ۳۰ درجه با در نظر گرفتن محدوده سرعت اسپیندل ۵۰۰۰ تا ۷۰۰۰ دور بر دقیقه و محدوده عمق برش صفر تا ۵ میلی‌متر انجام شده و نتایج در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ مشخص شده است، با افزایش زاویه مارپیچ مرز ناپایداری انشعاب فلیپ حذف می‌شود. شکل ۶ فرایند فرزکاری مخالف با زاویه مارپیچ ۱۰ درجه را با استفاده از پارامترهای جدول ۴ در بارهای جانبی مختلف نشان می‌دهد. با مشاهده این شکل مشخص می‌شود که با افزایش بار جانبی فلیپ در اندازه تغییر می‌کند، اما در موقعیت آنها، در محدوده سرعت اسپیندل یکسان تغییری حاصل نمی‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش بار جانبی اندازه انشعاب هویف افزایش یافته و با افزایش بیشتر در بار جانبی انشعاب فلیپ شروع به حذف شدن می‌نماید. اساساً دالان‌های فلیپ^{۱۲} مربوط به آثار ضربه در هنگام ورود و خروج ابزار از قطعه‌کار بوده و مستقل از جهت پیشروی می‌باشند.

۶. نتیجه‌گیری

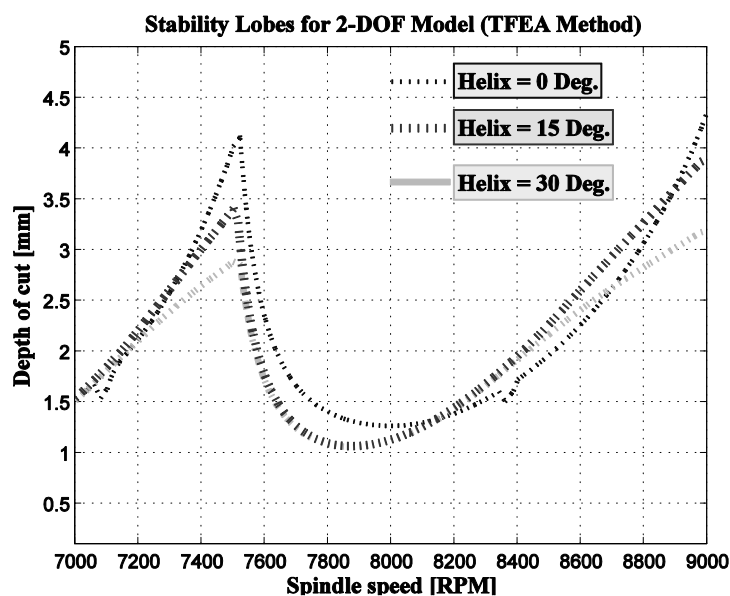
حدود پایداری فرایند فرزکاری یک درجه آزادی با لبه برنده مارپیچ با استفاده از روش آنالیز المان محدود زمانی شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی در بارهای جانبی گوناگون نشان می‌دهد که با افزایش بار جانبی انشعاب فلیپ در اندازه تغییر می‌کند، اما در موقعیت آنها، در محدوده سرعت اسپیندل یکسان تغییری حاصل نمی‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش بار جانبی اندازه

فلیپ مربوط به آثار ضربه در هنگام ورود و خروج ابزار از قطعه کار بوده و مستقل از جهت پیشروی می‌باشند.

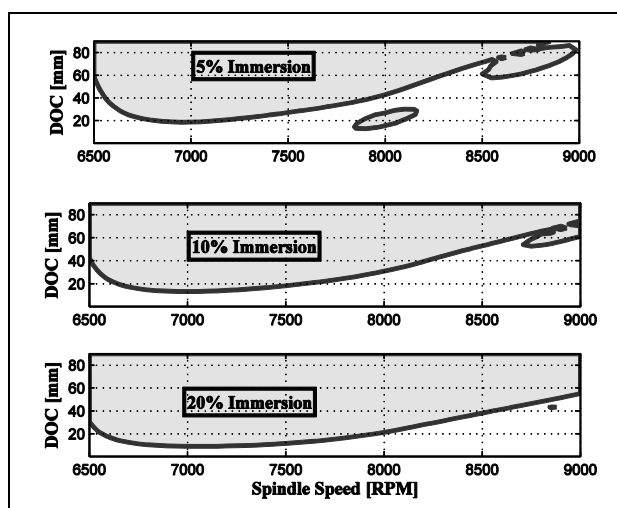
انشعاب هوپف افزایش یافته و با افزایش بیشتر در بار جانبی انشعاب فلیپ شروع به حذف شدن می‌کند. اساساً انشعاب

جدول ۵. شرایط برشی

۲	تعداد دندانه‌های برشی
۱۲ میلی‌متر	قطر ابزار
۰/۱ میلی‌متر بر دندانه	پیشروی بر دندانه
۲ به ۱۲	نسبت عمق برش شعاعی به قطر ابزار



شکل ۵. دالان‌های پایداری برای زاویه‌های ماریچ ۰، ۱۵ و ۳۰ درجه



شکل ۶. دالان‌های پایداری برای فرایند فرزکاری مخالف با زاویه ماریچ ۱۰ درجه و بارهای جانبی مختلف

جدول ۴. پارامترهای انتخاب شده از مرجع [۸]

ضرب برش ^{۱۵}		پارامترهای ابزار ^{۱۴}		پارامترهای مودال ^{۱۳}	
۸۰۴/۳×۱۰ ^۶ نیوتن بر متر مربع	K_t	صفر	زاویه مارپیچ بر حسب درجه	۵/۳۶۴ کیلوگرم	جرم
		۱۰			
		۳۰			
		۴۵			
۳۳۱×۱۰ ^۶ نیوتن بر متر مربع	K_n	۲۰	قطر ابزار بر حسب میلی متر	۲۱/۶×۱۰ ^۶ نیوتن بر متر	ثابت فنر
		۵ درصد درگیری	$aD = \frac{a_e}{D}$	۴۲۱/۹۴۸ نیوتن ثانیه بر متر	ضرب میرایی

۷. مآخذ

- [1] Boothroyd G. & Knight W. *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 1989.
- [2] Insperger, T., B.P. Mann, G. Stepan, P.V. Bayly. "Stability of up-milling and down-milling, part 1: alternative analytical methods." *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, 2003, pp. 25–34
- [3] Oliver Rott, Dietmar Homberg, Carsten Mense. A comparison of analytical cutting force models, ISSN 0946 – 8633, 2006.
- [4] Bayly, P.V., Halley, J.E., Mann, B.P. and Davies, M.A. Stability of interrupted cutting by temporal finite element analysis, *Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conference*, Pittsburgh, PA, 2001.
- [5] Mann, B.P., Bayly, P.V., Davies, M.A., Halley, J.E. Limit Cycles, "Bifurcations and Accuracy of the Milling Process." *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 277, pp. 31-48.
- [6] Gradisek J., Govekar, E., Grabec, I., Weinert, K., Kalveram, M., Insperger, T., Stépán, G. "On Stability Prediction for Low Radial Immersion Milling." *Machine Science and Technology*, 2005, pp.117–130.
- [7] Altintas, Y. "Manufacturing Automation, Metal Cutting Mechanics." *Machine Tool Vibration and CNC Design*, Cambridge University Press, 2000.
- [8] Insperger, T., Muñoa, J., Zatarain, M., Peigné, G. "Unstable Islands in the Stability Chart of Milling Processes Due to the Helix Angle." *CIRP 2nd Int. Conference High Performance Cutting*. June 12-13, Vancouver, BC, Canada, 2006.

پی نوشت

- Hopf or Poincaré–Andronov–Hopf bifurcation
- Flip Bifurcation
- time finite element analysis
- load cell

- D.J. BIRCHALL or DJB Instruments,
<http://www.djbinstruments.com> (accessed March 13, 2014)
- pulse

-
7. chip load
 8. high-speed steel (HSS)
 9. overhang
 10. damping ratio
 11. stiffness
 12. Flip lobes
 13. modal parameters
 14. tool parameters
 15. cutting coefficient