

ماهنامه علمى پژوهشى

، مکانیک

mme.modares.ac.ir



بررسی اثر جهت گیری زبری سطح بر ناپایداری ترموالاستیک در سطوح لغزشی روان کاریشده

ابوالفضل ابراهيمي1، صالح اكبرزاده2*، عليرضا وإعظيور1

1 - کارشناسیارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان 2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان * اصفهان، s.akbarzadeh@cc.iut.ac.ir ،84156-83111

چکیدہ	اطلاعات مقاله
انواع مختلف سطوح لغزشی مانند کلاچها و ترمزها، مستعد نوعی آسیب سطح تحت عنوان ناپایداری ترموالاستیک هستند. ناپایداری اشاره دارد به رشد نامحدود آشفتگیهای دما و فشار که منجر به دماهای موضعی بسیار بالا و سایش آن نقاط میشود. در این پژوهش اثر بافت سطح بر روی ناپایداری ترموالاستیک در رژیم روانکاری مخلوط مورد بررسی قرار میگیرد. بدین منظور از مدلی که شامل یک سطح صیقلی با رسانایی حرارتی بالا و یک سطح زبر با رسانایی حرارتی بسیار پایین است، استفاده میشود. در این تحقیق برای سطوح زبر از یک پروفیل زبری سطح تولیدشده به روش عددی استفاده شده است. در ادامه به کمک ضرایب جریان که ضرایب اصلاحی معادله رینولدز برای در نظر گرفتن زبری هستند، تأثیر بافت سطح بر روی ناپایداری ترموالاستیک بررسی میشود. برای انجام این کار از الگوریتمی استفاده میشود تا به کمک آن برای سه گونه جهت گیری زبری یعنی طولی، عرضی و همسان گرد، سرعت بحرانی که بیشتر از آن ناپایداری ترموالاستیک اتفاق میافتد و منجر به تشکیل نقاط داغ دیده میشود، بهدست میآید. در نهایت مشخص میشود که سرعت بحرانی که سطح را در آستانه ناپایداری ترموالاستیک افر گرفتن زبری	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 22 اردیبهشت 1394 پذیرش: 17 مرداد 1394 ارائه در سایت: 08 مهر 1394 <i>کلید واژگان:</i> بافت سطح زبری سطح ناپایداری ترموالاستیک تریبولوژی

Study on the effect of surface roughness pattern on the thermoelastic instability in lubricated sliding surfaces

Abolfazl Ebrahimi¹, Saleh Akbarzadeh^{1*}, Alireza Vaezpour¹

1- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran * P.O.B 8415683111 Isfahan, Iran, s.akbarzadeh@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

ABSTRACT

Original Research Paper Received 12 May 2015 Accepted 08 August 2015 Available Online 30 September 2015

Keywords: Surface Pattern surface roughness Thermoelastic Instability Tribology

The different kinds of sliding surfaces like clutches, and breaks are susceptible to a surface damage called thermoelastic instability. Instability refers to the unlimited growth turbulence of temperature and pressure, leading to very high local temperatures and wear on the hot spots. In this research, the effect of surface texture on the thermoelastic instability is investigated under mixed lubrication regime. For this purpose, a model consisting of a smooth surface with high thermal conductivity and a rough surface with low thermal conductivity is considered. Thus, a computer program is employed to numerically generate three different surface roughness patterns, i.e. transverse, longitudinal, and isotropic. Then the flow factors which are correction factors to the Reynolds equation for considering the surface roughness pattern are employed to study the effect of surface pattern on the thermoelastic instability. To conduct this study, an algorithm is developed to regenerate the thermoelastic instability results in the published literature and then is used to find the critical speed for three types of surface patterns beyond which thermoelastic instability leading to the formation of hot spots is likely to occur. Finally it is shown under similar operating conditions; the critical speed is highest for the longitudinal surface pattern.

rom m	را به شکل چرخههای سایشی ترموالاستیک یا تنش یاتاقانی شدید که به	
loaded 1	وسیله افزایش ناگهانی در دما مشخص میشود، آشکار میکند. ناپایداری	نسبی است و شامل
Down	اشاره دارد به رشد نامحدود آشفتگیهای دما و فشار که منجر به دماهای	بر است. زبری سطوح
_	موضعی بسیار بالا میشود که آنها را نقاط داغدیده اتلاق میکنند [1].	ی کمتر هستند که
[+	آببندها، ترمزها، کلاچها و در کل سطوح لغزشی، مستعد بروز نقاط داغدیده	هت گیری و توزیع این
.11.48.	هستند. نقاط داغدیده همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است،	طح به شدت میتواند
1394.15	بهصورت مناطقی سیاه بر سطح پدیدار میشوند و بیانگر تنش موضعی بالا	و کاهش عمر قطعات
75940.	بوده و می تواند منجر به شکست ماده شود.	ترموالاستيك خودش
1.1.102		
8	Dioaso cito this article using:	

1 - مقدمه

تريبولوژی دانش مربوط به سطوح درگير در حرکت مطالعه اصطکاک، سایش و روانکاری در سطوح درگیر درگیر، ریزناهمواریهایی در اندازه میکرومتر یا حتے بهصـورت قلـهها و درههاست. بسته به اندازه، شکل، جه ناهمواریها، ویژگیهای روانکاری هیدرودینامیکی سط تغییر کند. یکی از یدیدههایی که می تواند سبب آسیب بشود نایایداری ترموالاستیک است. در عمل، نایایداری

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید: Please cite this article using: A. Ebrahimi, S. Akbarzadeh, A. Vaezpour, Study on the effect of surface roughness pattern on the thermoelastic instability in lubricated sliding surfaces, Modares Mechanical *Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 17-25, 2015 (In Persian)



شکل 1 تصویری از مناطق داغدیده پس از تنها یک بار درگیری کلاچ [2]

مفهوم ناپایداری به بیان ریاضی مسئله با استفاده از تکنیک آشفتگی مشخص می شود که در آن پاسخ سیستم به یک اختلال در ضخامت فیلم، مورد آزمایش قرار می گیرد [3]. برای مشخص کردن استعداد یک سیستم به وقوع ناپایداری ترموالاستیک، یک موج سطحی کوچک که نشانگر یک اختلال در سیستم است، به سیستم تحمیل می شود. موج سطحی تحمیل شده، حتی بسیار کوچک، بر پروفیل سرعت در سیال، توزیع فشار هیدرودینامیکی و تعادل حرارتی در فیلم اثر می گذارد. در نتیجه، میدان تغییر شکل کل، شامل تغییر شکل های حرارتی و مکانیکی، تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. به کمک روابط تئوری می توان پیش بینی کرد که آیا در یک سرعت کاری، مجموع این تغییر شکل ها به صورت نامحدود رشد می کند و منجر به شکست می شود و یا میرا می شود، به عبارت دیگر بیان می کند که سیستم از نظر ترموالاستیکی پایدار است [1].

پس در مجموع میتوان بیان کرد که اگر هر یک از سطوح، توسط یک اختلال کوچک آشفته شود، دیگری ممکن است نامحدود رشد کرده (ناپایدار)، میرا شود (پایدار) و یا بدون تغییر بماند (ذاتا پایدار). در حالت ذاتا پایدار، آشفتگی یک سری از اثراتی را ایجاد میکند که مجموع آنها با هم باعث بازتولید آشفتگی اصلی میشود (شکل 2) [4].

نخستین مطالعه مستقیم در زمینه ناپایداری ترموالاستیک به تحقیق باربر [5] در سال 1969 باز می گردد. در این مقاله او با ارایه یک مدل و انجام آزمایشهایی، به اثبات نظریه خود در مورد ناپایداری ترموالاستیک پرداخت. انبساط حرارتی تماسهای موضعی میتواند به صورت ناپایدار رشد کند. البته سایش اثری میراکننده برآن دارد. پایداری لغزش ترموالاستیک در تماس سطوح جامد در سال 1972 توسط داو و بورتون آزمایش شد. در این آزمایش که ناپایداری ترموالاستیک را به کمک تماس لغزشی بین یک تیغه نازک و یک جسم از یک طرف بینهایت شبیه سازی می کند، آنها نشان دادند که تماس بین دو صفحه لغزشی ناپایدار است، چنان چه سرعت لغزش از یک مقدار بحرانی بیشتر شود که وابسته به طول موج آشفتگی دارد [6].



در سال 1973 بورتون و همکارانش، ناپایداری ترموالاستیک را برای یک مدل شبه آببند بیان کردند [7]. این مدل هندسهای را ارائه میدهد که شامل دو تیغه مستقیم در تماس با هم است. مدل، معادلهای برای سرعت بحرانی در آستانه ناپایداری ترموالاستیک ارائه میدهد. این معادله پیشبینی میکند که سرعت بحرانی با ضریب اصطکاک و ضریب انبساط حرارتی رابطه عکس دارد.

برای حالت سطوح موازی روان کاری شده، بنرجی و بورتون (1976) سرعت بحرانی را استخراج کردند که آستانه ناپایداری ترموالاستیک را بیان می کند [4]. آن ها سطوح را به صورت یک رسانای حرارتی خوب که بر یک عایق خوب می لغزد، مدل کردند که فرض معقولی برای کلاچ است. معادله بنرجی و بورتون برای سرعت بحرانی که آستانه ناپایداری ترموالاستیک را مشخص می کند به صورت رابطه (1) است.

$$U_{\rm cri} = h_0 \kappa \sqrt{\frac{k_s}{\alpha \mu}}$$
(1)

 μ که h_0 ضخامت نامی روان کار، **x** عدد موج، k_s رسانایی حرارتی جسم رسانا، μ ویسکوزیته روان کار و α ضریب انبساط حرارتی جسم رساناست.

جنگ و خوانساری [8]، ناپایداری ترموالاستیک را با در نظر گرفتن زبری سطح بررسی کردند، همچنین جنگ و خوانساری در [9] به بررسی تأثیر زبری سطح بر ناپایداری ترموالاستیک و در حضور روانکار پرداختند. مدلی که آنها از آن استفاده کردند، مدل 1976 بنرجی و بورتون بود که یک جسم رسانای حرارتی بر یک عایق حرارتی میلغزد. مطالعات بیانشده نشان میدهند که دو سطح در روانکاری مرزی سرعت بحرانی بسیار کمتری نسبت به سطوحی که کاملا توسط یک فیلم سیال جدا شدهاند، دارند.

نخستین و شاخصترین کار انجامشده در زمینه تأثیر زبری سطح بر فیلم روان کار توسط پتیر (1978) صورت گرفت [10]. او در پایان نامه خود به تفصیل به چگونگی اصلاح معادله رینولدز جهت بررسی روان کاری سطوح زبر توسط مدلی تحت عنوان مدل جریان میانگین پرداخت. ایشان با معرفی ضرایبی با نام ضرایب جریان، اثر زبری را بررسی کرد. برای تعیین اثر ضرایب فرایبی با نام ضرایب جریان، اثر زبری را بررسی کرد. برای تعیین اثر ضرایب و عرضی) مورد توجه قرار گیرد. هر یک از این جهت گیریها (همسان گرد، طولی سطح اثر می گذارند و سیستم روان کاری را تحت تأثیر قرار میدهند [11]. به عبارت دیگر جهت گیری زبریها بر ضرایب جریان و در نتیجه فشار بهدستآمده از حل معادله رینولدز و پیرو آن تغییر شکل ناشی از فشار بهدرودینامیکی اثر گذار است. از طرفی در مقاله سال 2000 جنگ و هیدرودینامیکی اثر گذار است. از طرفی در مقاله سال 2000 جنگ و نتها برای حالت زبری همسان گرد بررسی شده و سرعت بحرانی که در آن ناپایداری ترموالاستیک اتفاق میافتد، تنها برای جهت گیری همسان گرد ناپایداری ترموالاستیک اتفاق میافتد، تنها برای جهت گیری همسان گرد بررسی شده است.

با توجه به این که در تماسهای لغزشی، مانند تماس در کلاچها، ترمزها و

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دوره 15، شماره 11

18

شود. ابتدا باید مدلی برای تعیین ضخامت فیلم روان کار و فشار تماسی معرفی شود. برای این کار ضرایب جریان تجربی تعریف می شود تا معادله رینولدزی که فشار میانگین تماس الاستوهیدرودینامیک را پوشش میدهد، استخراج شود. در گام دوم، سطوح با زبریها و الگوهای مختلف تولید شود که برای این کار از یک برنامه رایانهایی استفاده شده است. در این برنامه پارامتر الگوی سطح که نشان دهنده نحوه قرار گیری زبری هاست و همچنین انحراف معیار ارتفاع زبریها بهعنوان ورودی درنظر گرفته می شود و یک پروفیل زبری سطح بهصورت عددی تولید می شود. در گام نهایی هم به تحلیل مسئله ناپایداری ترموالاستیک پرداخته می شود. برای این تحلیل، تغییر شکلهای ناشی از اعمال یک موج سطحی فرضی محاسبه می شود و با اعمال شرط ناپایداری ترموالاستیک، مقادیر سرعت بحرانی بهعنوان خروجی اصلی مدل، تعیین می شود. در ادامه به تشریح این مراحل پرداخته می شود.

2-1- تحلیل روان کاری سطوح زبر با استفاده از معادله رینولدز میانگین

بیشتر مطالعات نظری بر فیلم روان کار، بر پایه سطوح صیقلی یاتاقانی هستند. با این وجود اگر ضخامت فیلم از مرتبه ارتفاع زبری باشد، این فرض دیگر صادق نخواهد بود و تأثیر زبری باید در نظر گرفته شود. ضخامت فیلم موضعی در یک یاتاقان زبر از ضخامت فیلم نامی (که فاصله بین سطوح میانگین دو سطح است) و دامنههای زبری تصادفی دو سطح تشکیل شده است. نسبت ضخامت فیلم نامی به انحراف استاندارد زبری، h/σ ، یارامتر مهمی است که اهمیت نسبی تأثیرات زبری را نشان میدهد. هنگامی که این پارامتر از عدد 3 بزرگتر است، اصطلاحا رژیم روانکاری هیدرودینامیکی است که در آن زبری سطوح اثری ندارد، اما هنگامی که این پارامتر مقادیر کوچکتری داشته باشد رژیم روانکاری مخلوط یا مرزی است که در آن اثر زبریها باید حتما لحاظ شود [10]. در این رژیم بار کلی شامل بار هیدرودینامیکی مربوط به فیلم سیال و بار تماسی مربوط به تماس زبریهاست. به طور مشابه، اصطکاک کل، مجموع مؤلفه های اصطکاکی هیدرودینامیکی و ناهمواری هاست.

در اطراف یک نقطه تماس، تغییر شکل ایجاد می شود. فرض می شود که هندسه فیلم در اطراف نقطه تماس تغییر نمی کند. تغییری جزئی در هندسه فیلم، سبب تنها تأثیری نامی بر جریان متوسط میشود، زیرا با تغییر جزئی در هندسه فیلم، جریان متوسط تغییر قابل ملاحظهای نمی کند. البته این فرض هنگامی صادق خواهد بود که h/o<0.5 باشد. در این حالت قسمت زیادی از مساحت نامی در تماس قرار خوهد گرفت. در نتیجه مدل جریان میانگین در این رژیم کم دقت تر خواهد بود [12].

از آنجایی که ضخامت فیلم موضعی، یک کمیت تصادفی است، فشار ایجاد شده در یک یاتاقان زبر نیز یک کمیت تصادفی است. با این وجود معمولا در یک یاتاقان، فشار متوسط کمیت مطلوب است و بیشتر مطالعات مرتبط با زبری، در پیش بینی فشار متوسط بدون حل برای فشار موضعی تصادفی است. این فرآیند شامل استخراج معادله رینولدزی است که فشار متوسط در یاتاقان زبر را پوشش دهد. این معادله برای ساختار زبری کلی توسط پتیر [12] استخراج شده و هدف آن معادله رینولدزی است که قابل اعمال به هر ساختار زبری کلی باشد. این راه حل «مدل جریان میانگین» نام دارد که از شبیهسازی جریان عددی برای استخراج معادله رینولدزی که فشار متوسط در یاتاقانهای زبر را پوشش میدهد، استفاده می کند. این مدل برای تعریف دستهای از ضرایب جریان تجربی استفاده می شود به گونهای که جریان روغن را بتوان در قالب این ضرایب جریان و مقادیر متوسط مانند فشار متوسط و ضخامت فیلم نامی بیان کرد. سپس یک معادله رینولدز متوسط در

قالب این ضرایب جریان استخراج می شود. برای استخراج ضرایب جریان برای ساختار زبری داده شده، از مقادیر جریان متوسط بهدست آمده از راه حل عددی یک یاتاقان مدل با زبری تصادفی یا اندازه گیری شده استفاده می شود. در نتیجه استفاده از شبیهسازی به این مدل اجازه میدهد تا هر نوع ساختار زبرى را تحليل كند [10].

ضخامت فیلم موضعی h_T بهصورتی که در شکل 3 آورده شده، براساس رابطه (2) تعريف مي شود. (2)

 $h_{\rm T} = h + \delta_1 + \delta_2$

که h ضخامت فیلم نامی و δ_1 و δ_2 دامنه زبری تصادفی دو سطح اندازه گیری شده از سطوح میانگینشان است. فرض می شود که δ_1 و δ_2 پروفیل زبری دو سطح با توزیع گوسی و میانگین صفر و انحراف معیار استاندارد به $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$ ترتيب σ_1 و σ_2 را دارند. زبری ترکيبی $\delta = \delta_1 + \delta_2$ دارای واريانس σ_2 است.

در نقاط تماس، $h_{T}=0$ است و فاصله میانگین \overline{h}_{T} به صورت رابطه (3) تعريف مي شود [13].

 $\overline{h_{\rm T}} = \int_{-\infty}^{\infty} (h + \delta) f(\delta) d\delta$ (3)

برای یک روان کار همدما و تراکمناپذیر در تماس الاستوهیدرودینامیک، فشار توسط معادله رینولدز بیان می شود. در مطالعه پیش و باید معادله رینولدزی كه فشار ميانگين در تماس الاستوهيدروديناميك را پوشش مىدهد، استخراج شود. بدین جهت جریان مورد انتظار در یک یاتاقان زبر تحلیل می شود. یک حجم کنترل با مساحت پایه ΔxΔy و ارتفاع h_T در نظر گرفته می شود. فرض می شود که ۵۲۵۷ به حدی بزرگ باشد که تعداد زیادی ناهمواری را دربرگیرد، ولى نسبت به اندازه ياتاقان همچنان كوچك باشد. با تحليل جريان واحد متوسط (مورد انتظار) وارد شده به حجم کنترل و اعمال یک بالانس جریان متوسط بر آن، معادله رينولدز ميانگين بهدست مي آيد [13].

 $\frac{\partial}{\partial x} \left(\phi_x \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi_y \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial \overline{p}}{\partial y} \right) = \frac{U_1 + U_2}{2} \frac{\partial \overline{h_T}}{\partial x} + \frac{U_1 - U_2}{2} \sigma \frac{\partial \phi_s}{\partial x} + \frac{\partial \overline{h_T}}{\partial t}$ که $ar{p}$ فشار متوسط (مورد انتظار) و همچنین U_1 و U_2 سرعت دو سطح در $ar{p}$ تماس است. ضرایب فشار $\phi_{\mathrm{x}} \, \phi_{\mathrm{y}} \, \phi_{\mathrm{x}}$ جریان فشار متوسط در یک یاتاقان زبر را با یک یاتاقان صیقلی مقایسه می کنند. ضریب جریان برشی ϕ_s ، انتقال جریان ϕ_{x} اضافی ناشی از لغزش در یک یاتاقان زبر را نشان میدهد. ضرایب جریان و $\phi_{
m s}$ و $\phi_{
m s}$ را از طریق شبیهسازی جریان میتوان به صورت رابطه (5) بهدست $\phi_{
m s}$ آورد [13].

 $\Phi_x = 1 - C e^{-rH} \gamma \le 1$ (5) $\Phi_x = 1 + C H^r \gamma > 1$

که $H=h/\sigma$ است. ثوابت C و r بهعنوان توابعی از γ (پارامتر الگوی سطح) در $H=h/\sigma$ جدول 1 آورده شدهاند [12].

(6) ضرایب جریان ϕ_{x} و ϕ_{y} مستقل از یکدیگر نیستند و براساس رابطه مربوط هستند.

(6)



مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دوره 15، شماره 11

مشابه ضرایب جریان فشار، ضریب جریان برشی، تابعی از ضخامت فیلم و پارامترهای زبری است. هرچند برخلاف ϕ_x که تنها وابسته به آمار زبری δ_2 و δ_1 ترکیبی δ است. ضرایب جریان برشی وابسته به پارامترهای آماری δ_1 و δ_2 بهطور جداگانه است. در نتیجه ϕ_s تابعی از h/σ ، انحرافات استاندارد σ_1 و σ_2 و پارامترهای الگوی سطح γ_1 و γ_2 دو سطح در گیر و به صورت رابطه (7) است.

 $\begin{aligned} \Phi_{s} = A_{1} H^{\alpha_{1}} e^{-\alpha_{2} H + \alpha_{3} H^{2}} \text{ for } H \leq 5 \\ \Phi_{s} = A_{2} e^{-0.25 H} \text{ for } H > 5 \end{aligned} \tag{7}$ [12] $<math>(A_{1}, A_{2}, A_{1}, A_{2}, A_{1}) = 0 \\ (A_{1}, A_{2}, A_{1}, A_{2}, A_{1}) = 0 \\ (A_{1}, A_{2}, A_{1}, A_{2}, A_{1}) = 0 \\ (A_{1}, A_{2}, A_{2}) = 0$

2-2- تولید زبری سطح بهصورت عددی

آورده شدهاند.

بررسی اثر زبری سطح بر عملکرد قطعات مکانیکی در تماس نیازمند داشتن اطلاعات کافی از این سطوح است. برای این کار میتوان سطوحی را با روشهای مختلف تولید و پرداخت کرد. از سوی دیگر، میتوان به کمک روشهای عددی زبری سطح را تولید کرد. این کار بسیار راحت تر و ارزان تر از ایجاد زبری سطحهای واقعی به شیوه مکانیکی است. در این مقاله از یک روش عددی برای تولید زبری سطح با الگوهای متفاوت استفاده شده [11] و برای تولید سطوح با زبریها و الگوهای مختلف از یک برنامه رایانهایی استفاده شده است. در این برنامه پارامتر الگوی سطح که نشان دهنده نحوه قرار گیری زبریهاست و همچنین انحراف معیار ارتفاع زبریها بهعنوان ورودی درنظر گرفته و یک پروفیل زبری سطح به صورت عددی تولید میشود. همچنین فرض میشود که ارتفاع زبریها دارای توزیع نرمال یا گاوسی است.

نحوه جهت گیری زبریهای سطح ممکن است همسانگرد¹ یا غیرهمسانگرد باشد. اگر بافت سطح یکسان و ثابت باشد، به آن همسانگرد گویند، اما در صورتی که پارامترهای زبری سطح وابسته به جهت گیری زبریها باشند، غیرهمسانگرد نامیده میشود که این جهت گیری موازی، ممکن است در جهت طولی یا جهت عرضی باشد. این الگوها را بهترتیب الگوی سطح طولی² و عرضی³ مینامند.

هدف از این قسمت ایجاد روند نمایی است که یک ماتریس از ارتفاعهای زبری $[\delta_{ij}]$ با ویژگیهای آماری معین تولید کند. $[\delta_{ij}]$ ارتفاع زبری در x=i\Deltax و زمری $[\delta_{ij}]$ با ویژگیهای آماری معین تولید کند. زبره ارتفاع زبری در این تحلیل $\Delta y = j\Delta y$ فرض میشود که ارتفاع زبریها دارای توزیع نرمال یا گاوسی است تابع همبستگی خودکار سطح را میتوان به صورت رابطه (8) نوشت.

$$R_{pq} = \begin{cases} \sigma^2 \left(1 - \frac{p}{n}\right) \left(1 - \frac{q}{m}\right) & q \le n \\ 0 & q < m \end{cases}$$
(8)

برای سادگی، n و mبهعنوان طولهای همبستگی استاندارد شده پروفیلهای x و y تعریف می شوند. طول همبستگی یک پروفیل، طولی است که در آن

n اگر برای سادگی $\Delta x = \Delta y$ اختیار شود، پارامتر الگوی سطح \P برابر با نسبت m به m است. تولید یک ماتریس ارتفاع زبری به شکل رابطه (4) را میتوان به وسیله یک انتقال خطی به صورت رابطه (10) ایجاد کرد.

$$\delta_{ij} = \frac{\sigma}{\sqrt{nm}} \sum_{k=1}^{m} \sum_{l=1}^{m} \eta_{i+k,j+l} \quad j = 1, 2, \dots N \quad j = 1, 2, \dots M$$
(10)

که η_{ij} اعداد تصادفی مستقل با توزیع یکسان و میانگین صفر و واریانس واحد است. M و N هم به ترتیب میزان تراکم نمونه زبری تولیدی در دو جهت x و y هستند [11]. برای تولید ارتفاع زبری با توزیع گوسی، این اعداد تصادفی باید توزیع گوسی نیز داشته باشند [10،13].

خواص مرتبط با جهت زبری توسط پارامتر الگوی سطح γ، در ابتدا توسط پکلنیک نشان داده شد که این پارامتر نیز گاهی تحت عنوان عدد پکلنیک شناخته میشود [14]. این پارامتر بهعنوان نسبت طولهای همبستگی x و y بهصورت رابطه (11) هم تعریف میشود.

$$\gamma = \frac{\lambda_{0.5x}}{\lambda_{0.5y}} \tag{11}$$

 γ را می توان به عنوان نسبت طول به عرض یک ناهمواری تعبیر کرد. ساختارهای زبری کاملا عرضی، همسان گرد و کاملا طولی به تر تیب دارای $\gamma=0,1,\infty$

همچنین فرض می شود که زبری ها، شیب های کم دارند درنتیجه معادله رینولدز به طور موضعی قابل اعمال است. این نوع زبری، زبری رینولدز نامیده می شود که در مقابل زبری استوکس قرار دارد و نیازمند اعمال معادله ناویراستوکس است [12].

نمونههایی از زبریهای تولیدشده توسط این روش در شکل 4 مشاهده می شود [11]. مقدار زبری میانگین برای تولید این زبریها σ=0.3 μm و مقدار پارامتر الگوی سطح ۲ به ترتیب شکل ها 1/50، 1 و 50 است.

2-3- تئورى مسئله ناپايدارى ترموالاستيک

شماتیکی ساده از سیستم تحت بررسی در مسئله ناپایداری ترموالاستیک در شکل 5 نشان داده شده است. مدل شامل یک سطح صیقلی با رسانایی حرارتی بالا و یک سطح زبر با رسانایی حرارتی بسیار پایین است. دلیل انتخاب این نوع مدل این است که یکی از کاربردهایی که در آن ناپایداری ترموالاستیک رخ میدهد کلاچ اتومبیل است. با در نظر گرفتن کلاچ اتومبیل بهعنوان جسم تحت بررسی، دیسک اصطکاکی اغلب تشکیل شده است از یک ماده با پایه کاغذ. در حالی که دیسک درگیر با آن از فولاد ساخته شده است. از آنجایی که رسانایی گرمایی ماده پایه کاغذ 10 بار کوچکتر از فولاد است، میتوان سیستم کلاچ را بهصورت یک سیستم رسانا- عایق گرمایی ساده کرد [15]. فاصله بین دو سطح با یک روانکار با لزجت مشخص پر شده است. در غیاب روانکار، یک سیستم رسانا- عایق بیشتر مستعد ناپایداری ترموالاستیک

	[12]	معادله (5) [1 ضرايب م	جدول
-	Г	С	r	بازه
-	0/11	1/48	0/42	<i>H</i> >1
	0/17	1/38	0/42	<i>H</i> >1
	0/34	1/18	0/42	<i>H</i> >0/75
	1	0/90	0/56	<i>H</i> >0/5
	3	0/225	1/5	<i>H</i> >0/5
	6	0/520	1/5	<i>H</i> >0/5
	9	0/870	1/5	<i>H</i> >0/5

صفر شود. n و mاز طریق رابطه (9) به نیمی از طول	تابع همبستگی خودکار
وند. نیمی از طول همبستگی λ _{0.5} ، طولی است که در	همبستگی مرتبط میش
گی پروفیل، به 50درصد مقدار آن در λ اهش	آن مقدار تابع همبستأ
	مىيابد.
$\lambda_{0,\text{EV}} = \frac{n\Delta x}{n\Delta x}$	
^{20.5X} 2	
$\lambda_{0.5y} = \frac{m\Delta y}{2}$	(9)
1- Isotropic 2- Longitudinal	
3- Transverse	

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

می شوند. یک موج سطحی کوچک که یک آشفتگی را به سیستم اعمال می کند، در نظر گرفته می شود. موج سطحی در نظر گرفته شده، حتی بسیار کوچک، پروفیل سرعت در سیال و توزیع فشار و نیز تعادل حرارتی در فیلم روان کار را تحت تأثیر قرار می دهد. در نتیجه، تمام میدان تغییر شکل تحت تأثیر قرار می گیرد. به کمک این روابط پیش بینی می شود که آیا در یک سرعت عملکردی، ترکیب این رشد تغییر شکل ها مسبب شکست می شود یا این که میرا می شوند.

2-3-1 - تغییر شکل سطح ناشی از فشار هیدرودینامیکی

(12)

دو سطح صیقلی که به وسیله یک روان کار با ضخامت h_0 از یکدیگر جدا شدهاند را در نظر بگیرید. یک موج سطحی کوچک (آشفتگی سینوسی) به صورت رابطه (12) که در جهت مثبت x و با سرعت c حرکت می کند بر سطح جسم رسانا تحمیل می شود [9].

 $h' = h_1 \sin\Omega(x-ct) + h_2 \cos\Omega(x-ct)$

که Ω عدد موج است. پس ضخامت کلی فیلم به صورت رابطه (13) می شود. $h=h_0+h'$ (13)

برای در نظر گرفتن زبری سطح، یک توزیع ارتفاع گوسی فرض می شود. زبری بیشتر سطوح مهندسی را می توان به صورت توزیع گاوسی درنظر گرفت. اگر $H=h/\sigma$ به صورت $H=h/\sigma$ رابطه (14) می شود [12،13].

$$h_{\rm T} = \frac{\sigma}{2} H \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{H}{\sqrt{2}}\right) \right] + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{1}{2}\right)H^2}$$
(14)

برای مشخص کردن تغییر شکل ناشی از فشار هیدرودینامیکی، توزیع فشار باید مشخص شود. پروفیل فشار با استفاده از شکل اصلاحشده معادله رینولدز محاسبه میشود که تأثیر زبری را در نظر می گیرد. براساس کار پتیر [10]، معادله رینولدز اصلاحی به صورت رابطه (15) می شود.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\Phi_{p} h^{3}}{12\mu} \frac{\partial p'_{h}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\Phi_{p} h^{3}}{12\mu} \frac{\partial p'_{h}}{\partial z} \right)$$

$$= \frac{-U}{2} \left(\Phi_{c} \frac{\partial h}{\partial x} + \sigma \frac{\partial \Phi_{s}}{\partial x} \right)$$

$$\mu \text{ (15)}$$

$$\mu \text{ be the set of t$$

$$\Phi_{\rm p} = 1.0.9e^{-0.92H} + 0.5$$

$$\Phi_{\rm s} = \begin{cases} 1.89H^{0.98}e^{-0.92H+0.05H^2} & 0.5 < H \le 5 \\ 1.126e^{-0.25H} & H > 5 \end{cases}$$

$$\Phi_{\rm c} = \frac{1}{2} \Big[1 + \operatorname{erf} \Big(\frac{H}{\sqrt{2}} \Big) \Big] \tag{16}$$

1000-0.56H 1 $H_{2}0E$

آشفتگی موج سطحی سبب تغییر در ضرایب جریان می شود. صرف نظر از



m=1, m=50, N=200, ورودی n=1, m=50, N=200, با مقادیر ورودی n=50, N=200, و ج - طولی M=200
 m=50, m=50, N=200 M=200 و ج - طولی n=50, m=1, N=200, M=200



جملات مرتبه بالا، ضرایب جریان و تماس اشفته در نتیجه یک موج سطحی کوچک، عبارتند از رابطه (17) [9]. $\Phi_{\rm p}=\Phi_{\rm p0}+\Phi_{\rm p}^{\prime}\frac{\dot{h}}{h_{0}}$ $\Phi_{\rm s}=\Phi_{\rm s0}+\Phi_{\rm s}^{\prime}\frac{\dot{h}}{h_{0}}$ $\Phi_{\rm c}=\Phi_{\rm s0}+\Phi_{\rm s}^{\prime}\frac{\dot{h}}{h_{0}}$ $\Phi_{\rm c}=\phi_{\rm c0}+\phi_{\rm c}^{\prime}\frac{\dot{h}}{h_{0}}$ (17) معادله (15) که تحت آشفتگی موج سطحی قرار دارد، با نادیده گرفتن نشت جانبی حل می شود. در این حالت از ترم دوم معادله رینولدز (15) صرفنظر می شود. این مورد برای سطوحی که عرض محوری بسیار بزر گ تر از طول آن

تغییر شکل مکانیکی شامل دو جزء است: تغییر شکل ناشی از فشار هیدرودینامیکی $\dot{\delta}_{\rm c}$ و تغییر شکل ناشی از فشار تماسی ناهمواریها $\dot{\delta}_{\rm c}$. تغییر شکل گرمایی $\dot{\delta}_{\rm th}$ حاصل از انبساط حرارتی جسم رساناست. در بسط تئوری که در ادامه میآید، هر کدام از این اجزاء تغییر شکل، مشخص

21

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

است. صحيح است كه تحت عنوان فرض ياتاقان با عرض بينهايت شناخته می شود. با وارد کردن معادلههای (13)، (16) و (17) در معادله (15) و در نظر گرفتن جملات مرتبه اول و حل معادله حاصل برحسب فشار، معادله (18) و (19) بەدست مىآيد [9]. 6111. - 11'

$$p_{h}^{\prime} = \frac{6\mu U\varphi_{h}}{\Omega^{2}h_{0}^{3}}\frac{dh}{dx}$$

$$H_{0}\varphi_{n} + \varphi_{n}^{\prime}$$
(18)

$$p_{\rm h} = \frac{H_0 \varphi_{\rm p0} + \varphi_{\rm s}}{H_0 \varphi_{\rm p0}}$$
(19)

که H₀=h₀/σ است. معادله (18) فشار هیدرودینامیکی ناشی از موج سطحی آشفته شده و تغییر در ضرایب جریان را نشان می دهد. پس از به دست آوردن فشار هيدروديناميكي آشفتهشده، ميتوان تغيير شكل الاستيكي را با استفاده از عبارت (20) محاسبه کرد [4].

$$\delta_{h}^{'} = \frac{2p_{h}^{'}}{E\Omega} = \frac{12\mu U\varphi_{h}}{E\Omega^{3}h_{0}^{3}}\frac{dh^{'}}{dx}$$
(20)

حال در ادامه به محاسبه تغییر شکل سطح ناشی از فشار تماسی پرداخته می شود. فشار متوسط ناشی از فشار تماسی Pc مستقیما با نسبت سطح تماس واقعی به سطح تماس نامی، متناسب است. برای در نظر گرفتن این تأثیر از ضريب تناسب E_c استفاده می شود. این پارامتر که مدول الاستیک برای تماس $P_{\rm c}=E_{\rm c}(A_{\rm r}/A_{\rm n})=E_{\rm c}A_{\rm c}$ نامیده میشود، با مساحت واقعی تماس بهصورت $A_{\rm c}$ مساحت واقعی و مساحت نامی تماس و $A_{\rm n}$ مرتبط می شود که $A_{\rm r}$ مساحت واقعی تماس در واحد مساحت نامی است. مقدار $E_{\rm c}$ باید از طریق تجربی بهدست آید. سطح واقعی تماس در واحد سطح نامی با استفاده از تئوري گرينوود و ويليامسون بهدست ميآيد [16] كه نتيجه آن بهصورت , ابطه (21) است.

$$A_{c} = \pi \eta \gamma \sigma \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{1}{2}\right)H^{2}} + \frac{1}{2} \left(\operatorname{erf}\left(\frac{H}{\sqrt{2}}\right) - 1 \right) \right]$$
(21)

معادله یادشده برای سطح واقعی تماس یک میانگین آماری از توزیع گوسی ناهمواریها در واحد سطح نامی میدهد. سطح واقعی آشفتهشده تماس، A'، بهوسیله وارد کردن معادله (13) در (21) و صرفنظر کردن از جملات مرتبه بالا بەصورت روابط (22،23) بەدست مىآيد.

$$A_{c}^{'} = -\pi\eta\gamma\sigma\varphi_{c}\frac{h}{h_{0}}$$
(22)

$$\varphi_{c} = \frac{H_{0}^{2}}{\sqrt{2\pi}} e^{-(\frac{1}{2})H_{0}^{2}} - \frac{1}{2}H_{0}$$

$$\left[erf\left(\frac{H_{0}}{\sqrt{2}}\right) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^{i}}{i!} \left(\frac{H_{0}}{\sqrt{2}}\right)^{2i+1} - 1 \right]$$
(23)

تغییر شکل الاستیک ناشی از فشار تماسی بر اثر تغییر در ضخامت فیلم سطحى به صورت رابطه (24) است [16].

$$\delta_{c}^{'} = \frac{2\rho_{c}^{'}}{E\Omega} = -\frac{2\pi\eta\gamma\sigma E_{c}\varphi_{c}}{E\Omega h_{0}}h^{'}$$
(24)

دو جزء تغییر شکل وجود دا آشفته شده $\delta_{
m h}^{\prime}$ و دیگری ناش

$$\nabla^2 h = (1 + v) \alpha T'$$

که
$$T'$$
 دمای آشفته در جسم رساناست. راه حل برای T' به صورت روابط (28،29) است [3]:

(27)

 $T' = T_0 e^{\beta t} e^{-\xi y} \sin(\Omega x + a y - \Omega c t)$

$$\xi = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\beta}{\kappa} + \Omega^2\right) + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\beta}{\kappa} + \Omega^2\right)^2 + \frac{\Omega^2 c^2}{\kappa^2}}}$$
(28)

$$\alpha = \pm \sqrt{-\frac{1}{2} \left(\frac{\beta}{\kappa} + \Omega^2\right) + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\beta}{\kappa} + \Omega^2\right)^2 + \frac{\Omega^2 c^2}{\kappa^2}}$$
(29)

از آنجایی که $0<\hat{z}$ است، a و 2همیشه علامت مخالف یکدیگر دارند. β تابع نمایی رشد موج دما برحسب زمان است که در بخشهای بعدی شرایط مختلف آن بررسی می شود. با استفاده از جابه جایی نرمال صفر سطح، پتانسیل جابهجایی ψ که معادله (27) را ارضا کند، به صورت روابط (30،31) مىشود[8].

$$\Psi = e^{\beta t} \left[e^{-\Omega y} \left(C \cos X_s + D \sin X_s \right) + e^{-\xi y} \left(P \cos X_s + Q \sin X_s \right) \right]$$
(30)

$$P = \frac{\left(1 + v \right) \alpha T_0 \kappa \Omega c}{\beta^2 + \Omega^2 c^2} , \quad Q = \frac{\left(1 + v \right) \alpha T_0 \kappa \beta}{\beta^2 + \Omega^2 c^2} , \quad C = \frac{1}{\Omega} \left(\epsilon \xi P + a Q \right) ,$$

$$D = -\frac{1}{\Omega} \left(a P + \xi Q \right)$$
(31)

$$I = -\frac{1}{\Omega} \left(a P + \xi Q \right)$$
(31)

$$\tau_{yy|y=0} = \frac{E\alpha\kappa\Omega}{\alpha^2 + \alpha^2 \alpha^2} T_0 e^{\beta t}$$

$$\times [\{a_{\beta} + c_{\Omega}(\Omega - \xi)\} \cos X_{s} + \{(\Omega - \xi)_{\beta} - ac_{\Omega}\} \sin X_{s}]$$
(32)

$$\delta_{th}^{'} = \frac{2\tau_{yy|y=0}}{E\Omega} = \frac{2\alpha\kappa}{\beta^{2} + \Omega^{2}c^{2}} T_{0}e^{\beta t}$$

$$\times \left[\left\{ a\beta + c\Omega(\Omega - \xi) \right\} \cos X_{s} + \left\{ \left(\Omega - \xi \right)\beta - ac\Omega \right\} \sin X_{s} \right]$$
(33)

با استفاده از معادلات (25) و (33) نتيجه بهصورت رابطه (35) میشود.

$$\delta' = [-A_1h_1 - A_2h_2 + A_3 A_4] \sin X_s + [A_2h_1 - A_1h_2 + A_3, A_4] \cos X_s$$

 $A_1 = \frac{2\chi\varphi_c}{E\Omega h_0}, A_2 = \frac{12m\mu U\varphi_h}{E\Omega^2 h_0^3}, A_3 = \frac{2\alpha\kappa}{\beta^2 + \Omega^2 c^2}, A_4 = \{(\Omega - \xi)\beta - ac\Omega\}T_0 e^{\beta t}$
(35)
 $\lambda_4 = \{(\Omega - \xi)\beta - ac\Omega\}T_0 e^{\beta t}$

مشخص شوند. ارزیابی و تعیین این دو پارامتر نیازمند در نظر گرفتن گرمای تولیدی اصطکاکی در فیلم سیال است که در ادامه میآید.

$$\begin{aligned}
E \Omega & E \Omega & E \Omega h_{0} & E$$

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

22

(25)

(26)

فشار تماسی ناهمواریهاست به صورت مشابه $artheta_3$ و $artheta_4$ به ترتیب مربوط به تغییر شکل مکانیکی ناشی از فشار هیدرودینامیکی و فشار تماسی ناهمواریهاست. معادلات (45) دو معادله برحسب U و c میدهند. با توجه به طبیعت

پیچیده این معادلات، برای حل آنها از تعدادی فرضهای سادهسازی پاسخ موج ساکن استفادہ می شود. موج ساکن (c=0) یعنی موج آشفتگی با سرعتی برابر با سرعت جسم رسانا حرکت میکند. سرعت بحرانی بیبعد برای موج ثابت ساكن، به صورت رابطه (47) مي شود [9].

$$\overline{U_{cr}} = -\frac{\vartheta_2}{2\vartheta_1} + \sqrt{\left(\frac{\vartheta_2}{2\vartheta_1}\right)^2 + \frac{2(1+\vartheta_4)}{\vartheta_1}}$$
(47)

و در صورتی که از تأثیر زبری صرفنظر شود ($\vartheta_2 = \vartheta_4 = 0$ زیرا $(\chi = 0)$ ، سرعت بحرانی برای موج به صورت رابطه (48) ثابت میشود.

$$\overline{U_{\rm cr}} = \sqrt{\frac{2}{\vartheta_1}} = \frac{h_0}{\kappa} \sqrt{\frac{k_{\rm s}}{\alpha\mu}}$$
(48)

در هنگام بررسی هندسههای مدور که تناوب وجود دارد، مناسب تر این است که از تعداد اختلالات در سیستم n' به جای عدد موج Ω استفاده شود. رابطه بین $n' \in \Omega$ و Ω بهصورت n'=Rاست.

3 - نتايج

در این قسمت ابتدا به محاسبه سرعت بحرانی پرداخته می شود و سپس سرعت بحرانی برای پرداخت سطحهای مختلف بدست میآید. همانگونه که از معادله (47) مشخص است، موج ساکن مستقل از تغییر شکل مکانیکی ناشی از فشار هیدرودینامیکی است، زیرا در این معادله ϑ_3 که ضریبی مرتبط با تغییر شکل مکانیکی ناشی از فشار هیدرودینامیکی است، حضور ندارد.

جدول 2 حاوى اطلاعات مرتبط با مشخصات روان كار، جسم رسانا و جسم عايق استفاده شده جهت ترسيم نمودارها در اين تحقيق است. با وارد کردن این اطلاعات در معادلات (47) و (48)، سرعت بحرانی U_{cr} بهعنوان تابعی از ضحامت فیلم *h*₀ مبتنیبر موج ساکن بهدست میآید. شکل 6 تغییر سرعت بحرانی U_{cr} بهعنوان تابعی از ضخامت فیلم h₀ مبتنیبر موج ساکن را نشان میدهد.

خطچینها نشاندهنده پیشبینی سرعت بحرانی برای سیستمی با جسم عایق زبر (معادله (47)) و خطوط پر نشاندهنده سرعت بحرانی برای سیستمی با جسم عایق صیقلی (معادله (48)) است.

[9] (ورودى	اطلاعات	2	جدول
-------	-------	---------	---	------

مقدار	واحد	نماد	روان کار، جسم رسانا و عایق
0/36	Pa.S	μ	ويسكوزيته
68/949	GPa	Ε	مدول يانگ
0/000022	K-1	Α	ضريب انبساط جسم رسانا
85/8	mm²/s	K	ضریب پخش گرمایی
230/14	W/mK	Ks	ضريب انتقال حرارت
0/055	μm	R	شعاع دیسک
6	μm	σ	زبری جسم عایق (rms)
500	μm	<i>r</i> p	شعاع قله ناهموارى
30	mm-2	η	تراكم ناهموارى
31	MPa	Ec	مدول الاستيك تماس
0/14	-	F	ضريب اصطكاك

$$\varphi_{\rm th} = -\varphi_{\rm c} + H_0 \tag{38}$$

گرمای اصطکاکی آشفتهشده ناشی از فشار تماسی ناهمواریها در یک سطح تماس نامی بهصورت رابطه (39) است [9]. fylko

$$q'_{c} = f P'_{c} = -\frac{f \chi \partial \varphi_{c}}{h_{0}} h'$$
(39)

که f ضریب اصطکاک تماس زبریهاست. تولید گرمای کلی، ترکیبی از اتلاف ناشی از لزجت سیال و گرمای اصطکاکی ناشی از تماس ناهمواریهاست. اگر فرض شود که تمام گرمای آشفته شده تولیدی به جسم رسانا منتقل شود، شرایط زیر باید در سطح جسم رسانا *y*=0 بهصورت رابطه (40) برقرار شود. ðТ

$$q'_{h} + q'_{c} = -k_{s} \frac{1}{\partial x} |_{y=0}$$
 (40)

و در نهایت با وارد کردن معادلات (37) و (39) در معادله (40) و استفاده از معادله (28)، رابط (41،42) حاصل می شود:

$$h_1 = -R\xi T_0 e^{\beta t} , h_2 = Ra T_0 e^{\beta t}$$
(41)

$$R = \frac{\kappa_{\rm s}}{\frac{\sigma_{\mu} U^2 \varphi_{\rm th}}{h_0 h_{\rm 0T}^2} + \frac{f_{\chi} U \varphi_{\rm c}}{h_0}} \tag{42}$$

همان طور که گفته شد، موج سطحی اعمال شده h مسبب سه تغییر شکل هیدرودینامیکی $\delta_{
m h}$ ، تماسی $\delta_{
m c}$ و انبساط گرمایی $\delta_{
m th}$ میشود. درنتیجه سیستم درصورتی میتواند آشفتگی اعمالشده را تحمل کند که رابطه (43) برقرار شود [9].

(43) $h' = \delta = \delta'_{h} + \delta_{c} + \delta'_{th}$

در صورتی که جمع تغییر شکلها در سمت راست کمتر از ضخامت فیلم آشفته شده h باشد، سیستم می تواند موج سطحی آشفته شده را تحمل کند، اختلال از بین میرود و سیستم از نظر ترموالاستیکی پایدار است.

در صورتی که تغییر شکل کل، بیشتر از ضخامت فیلم آشفته شده باشد، ناپایداری ترموالاستیکی بهوجود میآید. از نظر ریاضی، بدین معناست که پارامتر پایداری β>0 باشد که براساس معادله (28) بدین معناست که ناپایداری بدون مرز، همراه با زمان رشد کند و ناپایداری ترموالاستیک حتمی است

آستانه ناپایداری (سرعت بحرانی) با حل معادله (43) و با شرط eta=0بهدست مىآيد. تحت شرايط لغزش خشك، اثر هيدروديناميكى بر سيستم وجود ندارد. در نتیجه معادله $\dot{h'}=\dot{\delta_{c}}+\dot{\delta_{th}}$ برای آستانه ناپایداری حل می شود. در مورد اصطکاک خشک که شامل یک رساناست که بر یک عایق زبر لغزش دارد، یک فاصله جداسازی بین دو سطح وجود دارد. این فاصله (ضخامت فیلم برای سیستم اصطکاکیتر) تابعی از بار اعمال شده است. سرعت بحرانی برای سیستم خشک تابعی از فاصله جداسازی و در نتیجه تابعی از بار اعمالی است.

23

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.48.4]

با استفاده از معادلات (35) و (41)، و قرار دادن β=0، معادله بیبعد رابطه (44) استخراج می شود. $\overline{c} = \frac{c}{\Omega \kappa}, \ \overline{U} = \frac{U}{\Omega \kappa},$ $\overline{a} = \pm \sqrt{-\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 + \overline{c}^2}}, \ \overline{\xi} = \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 + \overline{c}^2}}$ (44)معادله بیبعد نهایی که برای مشخص کردن سرعت بحرانی باید حل شود، بەصورت روابط (45،46) است [9]. $\vartheta_1 \overline{a} \overline{U}_{cr}^2 + \left[\vartheta_2 \overline{a} + \vartheta_3 \overline{a} \overline{c}\right] \overline{U}_{cr} - \left[1 + \vartheta_4\right] \overline{\xi} \overline{c} = 0$ $\vartheta_1(1-\overline{\xi})\overline{U}_{cr}^2 + [\vartheta_2(1-\overline{\xi})-\vartheta_3\overline{\xi}c]\overline{U}_{cr} - [1+\vartheta_4]\overline{a}\overline{c} = 0$ (45)

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دوره 15، شماره 11





شکل 6 تغییر سرعت بحرانی به عنوان تابعی از ضخامت فیلم مبتنیبر موج ساکن



شکل 7 تغییر سرعت بحرانی به عنوان تابعی از ضخامت فیلم مبتنیبر موج متحرک . برای n=3.

پاسخ موج ساکن نقشه یپایداری را به دو قسمت مجزا تقسیم می کند. تمام سرعتهای کمتر از مرز نشان داده شده از نظر ترموالاستیکی پایدار هستند و سرعتی بیشتر از مقدار بحرانی باعث افزایش ناپایداری ترموالاستیکی پایدار میشود. بنابراین بنابر پاسخ موج ساکن، در یک ضخامت فیلم داده شده صرف نظر از اندازه آن، تنها یک سرعت بحرانی وجود دارد که فراتر از آن ناپایداری ترموالاستیک اتفاق میافتد. هرچند در واقعیت، در ضخامتهای فیلم بسیار بالا احتمال رخ دادن ناپایداری ترموالاستیک وجود ندارد، زیرا تئوری بر این فرض بنا شده است که جریان سیال کاملا توسعه یافته است و انتقال گرما در جهت شعاعی وجود ندارد.

پاسخ موج ساکن نشان میدهد که سرعت بحرانی با افزایش ضخامت فیلم افزایش مییابد. از نظر فیزیکی افزایش ضخامت فیلم باعث کاهش حرارت اصطکاکی و در نتیجه انبساط حرارتی کمتر جسم رسانا میشود. در

 h_0 شكل 7 تغيير سرعت بحرانى U_{cr} را بهعنوان تابعى از ضخامت فيلم h_0 براى سه اختلال موج (n=3) نشان مىدهد. پاسخها براساس پاسخ كامل براى موج متحرك (رابطهه (45)) محاسبه شدهاند. در شكل 7 پاسخ موج متحرك پارامتر با پاسخ موج ساكن (خط چينها) مقايسه شدهاند. در موج متحرك پارامتر مرتبط با تغيير شكل مكانيكى ناشى از فشار هيدروديناميكى در فرمولها ظاهر مىشود. در نتيجه نسبت منظرى 1 بهعنوان يك پارامتر در طول مرعت بحرانى موج ساكن كاهش مىيابد. كاهش بيشتر ضخامت فيلم باعث زيرا هنگامى كامل براى مى مى مىيابد. كاهش مىيابد. كاهش بيشتر ضخامت فيلم باعث مى مى و ماكن كاهش مىيابد. كاهش بيشتر ضخامت فيلم باعث مى مى مى د مى در نتيجه نسبت منظرى 1 بهعنوان يك پارامتر در طول مى مى مى مى مى يابد. كاهش مىيابد، فشار هيدروديناميكى نقش مى يابد. مى مى د موج ساكن منحرف شود.

متغیر m معرف پارامتر عرض است که بهصورت $A^2 \mathbf{n}^2 = \mathbf{m}$ تعریف می شود. برای سیستمی با عرض محدود ($m \neq 1$) و در فیلم حالت نازک، به دلیل وجود فشار هیدرودینامیکی بالا، در صورتی که تعداد زیادی ناپایداری در سیستم اتفاق بیافتد، سیستم برای TEI مهیا نیست. در صورتی که در سیستم با عرض بینهایت (m=1) این روند عکس است.

تغییر شکل مکانیکی بزرگ سبب کاهش احتمال ناپایداری ترموالاستیک میشود. تئوری پیشبینی می کند که هنگامی که ضخامت فیلم به اندازه کافی کوچک شود به نحوی که تأثیر فشار هیدرودینامیکی بر تغییر شکل مکانیکی غالب شود، ناپایداری ترموالاستیک ناپدید میشود. پاسخ موج متحرک به شدت تحت تأثیر نسبت منظری است. هنگامی که *۸* افزایش مییابد، سیستم از نظر ترموالاستیکی در ضخامتهای فیلم زیاد پایدارتر است زیرا تغییر شکل مکانیکی ناشی از فشار هیدرودینامیکی بزرگ میشود.

3-1-1 اثر الگوی سطح بر ناپایداری ترموالاستیک

در این قسمت، هدف تحقیق که بررسی اثر جهت گیری زبریها بر ناپایداری ترموالاستیک است، مورد بررسی قرار می گیرد. هنگامی که ترمهای معادله (43) مورد بررسی قرار می گیرد، مشخص می شود که تنها δ' یعنی تغییر شکل ناشی از فشار هیدرودینامیکی است که تابعی از جهت گیری زبریهاست و تغییر شکلهای ناشی از فشار تماسی و گرما مستقل از جهت گیری زبریهاست. این استقلال را با بررسی پارامترهای دخیل در دو معادله (24) و (33) می توان دریافت. اما هنگامی که پارامترهای معادله (20) بررسی می شود، تنها $\phi_{\rm h}$ است که وابسته به جهت گیری زبریهاست. این وابستگی را با توجه به رابطههای (16) و (19) می توان دریافت. زیرا ضرایب جریان $\phi_{\rm p}$ و $_{\rm s}$ با تغییر الگوی بافت سطح تغییر می کنند.

تأثیر خود را بر ضریب $artheta_3$ در معادله (46) میگذارد. $artheta_3$ نیز به تبع $arphi_{\sf h}$ آن بر سرعتهای بحرانی در معادله (45) تأثیرگذار است.

در رابطه (47)، که سرعت بحرانی برای حالت موج ساکن است، *9*3 تأثیری در سرعت بحرانی ندارد. پس میتوان نتیجه گرفت که جهتگیری

زبرىھ	حضور فیلم روانکار، تغییرات سرعت بسیار بیشتر از حالتی است که فیلم
براي	نازک است. این اتفاق منجر به مقدار بیشتر تولید حرارت در روانکار میشود.
ترموالا	برعكس با افزایش ضخامت فیلم، میزان اتلاف ویسكوز كاهش مییابد؛ بنابراین
(45)	فشار تماسی هنگامی که ضخامت فیلم زیاد باشد، کاهش مییابد.
نہ	سرعت بحرانی برای سطح زبر بسیار کمتر از سطح صیقلی است زیرا
های م	حرارت اصطکاکی بیشتری در فیلم تولید میشود. تئوری پیشبینی میکند که
ترسيم	هرچه سطح زبرتر باشد، احتما وقوع ناپایداری ترموالاستیک بیشتر است. با
از مقدا	افزایش ضخامت فیلم، تأثیر زبری کاهش مییابد و فراتر از h ₀ =3 <mark>0</mark> تأثیر زبری از
همساز	بین میرود به نحوی که پاسخهای سطوح صیقلی و زبر بر هم منطبق میشوند.

زبریها در حالت موج ساکن اثری بر سرعت بحرانی نمیگذارد. در نتیجه برای بررسی اثر جهتگیری زبری بر سرعت بحرانی آستانه ناپایداری نزموالاستیک، باید حالت کلی مسئله یعنی حالت موج متحرک در معادله (45) مورد بررسی قرار گیرد. های مختلف و برای سه دسته جهتگیری زبری در شکلهای 8، 9 و 10 نرسیم گردیده است. همانگونه که در این نمودارها مشاهده می شود، صرفنظر ز مقدار n و ۸ محدوده سرعت بحرانی برای جهتگیری زبری طولی بالاتر از

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

24



شکل 9 نمودار سرعت بحرانی برحسب ضخامت فیلم برایn=9 و n=0.05 و برای

جهتگیریهای زبری طولی، همسانگرد و عرضی



ارتفاع زبریها هR در دو سطح شیپینگشده و فرز انگشتشده، در حالت جهتگیری طولی زبریها نسبت به حالتهایی که عرضی است، بسیار کمتر است [17]. با کاهش ارتفاع زبریها، گرمای اصطکاکی و ضریب اصطکاک نیز کاهش مییابد و در نتیجه پدیده داغ دیدگی سطح در سرعت بالاتری اتقاق میافتد و آستانه سرعت بحرانی افزایش مییابد، همچنین در سطح سندبلاستشده ارتفاع زبریها در تمام جهتها تقریبا یکسان است [17] و در نتیجه سرعت وابسته به جهت کاربرد قطعه نیست.

4- جمع بندی

آنچه که در این پژوهش بدان پرداخته شد، لحاظ کردن بافت سطح در بررسی آستانه سرعت لغزشی است که از آن سرعت به بعد، ناپایداری ترموالاستیک اتفاق افتاده و منجربه بروز نقاط داغدیده روی سطح می گردد. بدین منظور از مدلی که شامل یک سطح صیقلی با رسانایی حرارتی بالا و یک سطح زبر با رسانایی حرارتی بسیار پایین است، استفاده شد و سپس به کمک ضرایب جریان تأثیر بافت سطح بر ناپایداری ترموالاستیک لحاظ شد. جهت تحقق این امر از الگوریتمی استفاده شد که نتایج حاصل از آن نشان میدهند که الگوی سطح طولی، سرعت بحرانی بالاتری را نسبت به الگوی سطح همسان گرد و عرضی ایجاد خواهد کرد. درنتیجه درکابردهای سطوح لغزشی باید به جهت قرارگیری بافت سطوح در مقابل یکدیگر تا حد امکان

5- مراجع

- [1] J.Y. Jang, M.M. Khonsari, *A generalized thermoelastic instability analysis*, Proc. R. Soc. London, Vol. 459, pp. 309-329, 2003.
- [2] K. Lee, J. R. Barber, Frictionally-Excited thermoelastic instability in Automotive Disk Brakes, *Journal of Lubrication Tech*nology, Vol. 115, pp. 607-614, 1993.
- [3] Z. C. Peng, M. M. Khonsari, M. D. Pascovici, On the Thermoelastic Instability of a Thin-Film-Lubricated Sliding Contact. *Journal of Engineering Tribology*, 217, 2003.
- [4] B. N. Banerjee, R. A. Burton, An Instability for Parallel Sliding of Solid Surfaces Separated by a Viscous Liquid Film. *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 98, pp. 157-166, 1976.
- [5] J. R. Barber, Thermoelastic instabilities in the sliding of conforming solids. Proc. R. Sot. London, 322, pp. 381-394, 1969.
- [6] T. A. Dow, R. A. Burton, Thermoelastic instability of sliding contact in the absence of wear, *Wear*, Vol. 19, pp. 315-328, 1972.
- [7] R. A. Burton, V. Nerlikar, S. R. Kilaparti, Thermoelastic Instability in a Seal-Like Configuration, Wear, Vol. 24, pp. 177-188, 1973.
- [8] J. Y. Jang, M. M. Khonsari, Thermoelastic instability Including Surface Roughness Effects. ASME Journal of Tribology, Vol. 121, pp. 648-654, 1999.
- [9] J. Y. Jang, M. M. Khonsari, Thermoelastic Instability With Consideration of Surface Roughness and Hydrodynamic Lubrication. *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 122, pp. 725-732, 2000.
- [10] N. Patir, Effects of Surface Roughness on Partial Film Lubrication Using an Average Flow Model Based on Numeriacal Simulation. Northwestern University, 1978.
- [11] A. Ebrahimi, S. Akbarzadeh, A. Vaezpour, effect of surface roughness pattern on the tribological performance of helical gears, *Journal of surface science and engineering*, Vol. 21, pp. 87-100, 2014. (In Persian)

- [12] N. Patir, H. S. Cheng, Application of Average Flow Model to Lubrication Between Rough Sliding Surfaces. *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 101, pp. 220-229, 1979.
- [13] N. Patir, H. S. Cheng, An Average Flow Model for Determining Effects of Three-Dimensional Roughness on Patial Hydrodynamic Lubrication, *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 100, pp. 12-17, 1978.
- [14] N. Patir, H. S. Cheng, Application of Average Flow Model to Lubrication Between Rough Sliding Surfaces. *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 101, pp. 220-229, 1979.
- [15] J. Zhao, B. Ma, H. Li, Y. Yi, The Effect of Lubrication Film Thickness on Thermoelastic Instability under Fluid Lubricating Condition, *Wear*, Vol. 303, pp. 146-153, 2013.
- [16] J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson, *Contact of nominally flat surfaces*, Proc. R. Soc. London Ser. A 295, pp. 300–319, 1966.
- [17] B. Griffiths, Manufacturing Surface Technology, London, Penton, 2001.

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

25