

ارائه یک مدل کرنش پایه بهبود یافته برای محاسبه عمر خستگی چندمحوری فلزات

رحمت... قاجار^{۱*}، صفا پیمان^۲، جواد علیزاده کاکلر^۳

* نویسنده مسئول: ghajar@kntu.ac.ir

واژه‌های کلیدی

خستگی چندمحوری، عمر خستگی، معیار کرنش پایه، معیار صفحه بحرانی.

چکیده

قطعات و سازه‌های مهندسی در بسیاری از موارد تحت بارگذاری‌های سیکلی قرار گرفته و دچار خستگی چندمحوری می‌شوند. در زمینه محاسبه عمر خستگی در حالت چندمحوری، معیارها و مدل‌های زیادی با قابلیت‌های متفاوت ارائه شده‌اند. انتخاب مدل برای محاسبه عمر خستگی چندمحوری با توجه به جنس، نوع بارگذاری و شرایط عملکردی هر یک از سازه‌های مهندسی، یکی از چالش‌های مطرح در فرایند محاسبه عمر است. در این مقاله، قابلیت چند معیار کرنش پایه مهم برای محاسبه عمر خستگی چندمحوری مورد بررسی، مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. سپس بر اساس شناخت مزیت‌ها و ضعف‌های معیارهای مورد بررسی، یک معیار صفحه بحرانی بهبود یافته، مناسب برای انواع بارگذاری‌های متناسب و نامتناسب، شده است. برای این مطالعه از داده‌های مربوط به آزمایش‌های واماندگی خستگی نمونه‌های فولادی NCM630 تحت بارگذاری‌های محوری-پیچشی استفاده شده است. این داده‌ها در قالب داده‌های مربوط به تنش، دامنه کرنش و عمر خستگی هستند. از قیاس نتایج تجربی و عمر محاسبه شده با استفاده از مدل بهبود یافته، قابلیت آن در تخمین عمر خستگی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۱- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

۱- مقدمه

معیار صفحه بحرانی بهبود یافته (برای انواع بارگذاری‌های متناسب و نامتناسب) ارائه می‌شود. پژوهش‌های این مقاله، حاصل مطالعات آزمایشگاهی [۲ و ۹] و عددی انجام شده بر روی نمونه‌های فولادی SNCM630 تحت اثر بارگذاری‌های نامتناسب محوری- پیچشی است. با توجه به زیاد بودن داده‌های مربوط به تاریخچه تنش-کرنش و نیز تنوع معیارهای ارائه شده، برای محاسبه عمر خستگی چندمحوری از کدنویسی در نرم‌افزار MAPLE استفاده شده است.

۲- معرفی معیارهای صفحه بحرانی خستگی

در میان معیارهای محاسبه عمر خستگی چندمحوری، معیاری مناسب است که پارامترهای موثر در محاسبه عمر خستگی را در نظر بگیرد. این پارامترها شامل: پلاستیسیته سیکلی، حالت تنش، بارگذاری نامتناسب و تنش متوسط هستند. در این قسمت، چند معیار مهم کرنش پایه محاسبه عمر خستگی چندمحوری به طور خلاصه با استفاده از مرجع [۱] معرفی و روابط مربوط به تعیین عمر خستگی آن‌ها ارائه می‌شود.

۲-۱- معیار کرنش عمودی بیشینه

معیار مزیور یک معیار صفحه بحرانی است. این مدل صفحه بازه کرنش عمودی بیشینه را به عنوان صفحه بحرانی در نظر گرفته و عمر خستگی را از رابطه زیر تعیین می‌کند:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\gamma} = \frac{\sigma'_f - \gamma \sigma_{n-mean}}{E} (\gamma N_f)^b + \varepsilon'_f (\gamma N_f)^c \quad (1)$$

پارامترهای رابطه (۱) مربوط به صفحه بحرانی می‌باشند.

۲-۲- معیار بران-میلر

این معیار از نوع صفحه بحرانی بوده و صفحه بازه کرنش برشی بیشینه را به عنوان صفحه بحرانی در نظر می‌گیرد. رابطه تعیین عمر خستگی این معیار به صورت زیر بوده که پارامترهای آن روی صفحه بحرانی لحاظ می‌شوند:

$$\frac{(\Delta \gamma)_{\max}}{\gamma} + S \Delta \varepsilon_n = A \frac{\sigma'_f - \gamma \sigma_{n-mean}}{E} (\gamma N_f)^b + B \varepsilon'_f (\gamma N_f)^c \quad (2)$$

$$\sigma_{n-mean} = \sigma_{n-max} - \frac{\sigma_{n-max} - \sigma_{n-min}}{\gamma}$$

$$A = 1/3 + 0.75S, B = 1/5 + 0.5S$$

واماندگی سیستم‌ها و سازه‌های مکانیکی عمدتاً در اثر تنش‌های چندمحوری اتفاق می‌افتد. بر این اساس، بررسی واماندگی سازه‌های مکانیکی با استفاده از تئوری‌هایی که بر مبنای تنش‌های چندمحوری ارائه شده‌اند مناسب‌تر می‌نماید. در سال‌های اخیر، بر مبنای همین دیدگاه روش‌های محاسبه عمر خستگی چندمحوری مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. نتیجه این پژوهش‌ها ارائه معیارهای متعدد محاسبه عمر خستگی چندمحوری است. [۱]

در بین معیارهای خستگی چندمحوری، معیارهای کرنش پایه از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. معیارهای کرنش پایه، به چهار دسته معیارهای کرنش پایه ابتدایی، انرژی پایه، صفحه بحرانی و ترکیبی صفحه بحرانی-انرژی تقسیم‌بندی می‌شوند. از مهمترین معیارهای کرنش پایه می‌توان به معیارهای کرنش بیشینه و کرنش برشی هشت وجهی اشاره نمود. همچنین معیار گارود و الین از جمله مهمترین معیارهای انرژی پایه به حساب می‌آیند. معیارهای بران-میلر، فاطمی-سوشی و اسمیت-واتسون-تاپر از نوع معیارهای صفحه بحرانی، و معیارهای لیو، چو-کونلی-بانن و گلینکا-وانگ-پلامتری از معیارهای ترکیبی صفحه بحرانی-انرژی هستند [۲].

معیارهای ذکر شده، با در اختیار داشتن تاریخچه تنش-کرنش بارگذاری متناسب یا نامتناسب، عمر خستگی چندمحوری را نتیجه می‌دهند. هر معیار برای شرایط خاصی از نوع بارگذاری (متناسب، نامتناسب)، مشخصات مصالح، وضعیت تنش و کرنش و مود شکست کاربرد داشته و لذا معیارهای متفاوت برای یک نوع بارگذاری خاص، جواب‌های متفاوت و گاه بسیار دور از هم را برای یک قطعه ارائه می‌دهند. بر این اساس، ابتدا باید مناسب بودن معیار انتخاب شده برای هدف مورد نظر روشن شود. بررسی‌ها نشان می‌دهند، اثر مود شکست مصالح، نوع بارگذاری و تاریخچه تنش و کرنش بر پاسخ‌های معیارهای خستگی چندمحوری هنوز به خوبی روشن نیست [۲-۸]. از سوی دیگر، ارزیابی کلی بعضی از معیارها برای شناخت بیشتر و چگونگی استفاده کاربردی آن‌ها نیز یک ضرورت به حساب می‌آید. در این مقاله، ابتدا چند معیار مهم کرنش پایه مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته و سپس با توجه به ضعف این معیارها، یک

۲-۵- معیار لیو

معیار مزبور از نوع ترکیبی صفحه بحرانی-انرژی می باشد. معیارهای ترکیبی، همزمان ویژگی های معیارهای صفحه بحرانی و انرژی را دارا هستند. این مدل، نخست صفحه با بیشینه حاصل ضرب بازه تنش عمودی در بازه کرنش عمودی را به عنوان صفحه بحرانی در نظر می گیرد و مقدار به دست آمده برای آن را با حاصل ضرب بازه تنش برشی در بازه کرنش برشی روی همان صفحه جمع می کند. سپس صفحه با بیشینه حاصل ضرب بازه تنش برشی در بازه کرنش برشی را به عنوان صفحه بحرانی در نظر می گیرد و مقدار به دست آمده برای آن را با حاصل ضرب بازه تنش عمودی در بازه کرنش عمودی روی همان صفحه جمع می کند. روابط ارائه شده برای این مدل به ترتیب برای موادی که تحت مود کششی و مود برشی آسیب می بینند، مناسب هستند:

$$\Delta W_I = \epsilon \sigma'_f \epsilon'_f (\nu N_f)^{b+c} + \frac{\sigma'_f{}^2}{E} (\nu N_f)^{2b}$$

$$\Delta W_I = (\Delta \sigma_n \Delta \epsilon_n)_{\max} + \Delta \tau_n \Delta \gamma_n \quad (۷)$$

$$\Delta W_{II} = \epsilon \gamma'_f (\nu N_f)^{b\gamma+c\gamma} + \frac{\epsilon \tau'_f{}^2}{G} (\nu N_f)^{2b\gamma}$$

$$\Delta W_{II} = (\Delta \sigma_n \Delta \epsilon_n + (\Delta \tau_n \Delta \gamma_n)_{\max})_{\max}$$

در این معیار مود آسیب برشی دارای دو صفحه بحرانی است، که بر هم عمودند.

۲-۶- معیار چو-کونلی-بانن

این معیار به عنوان یک معیار ترکیبی صفحه بحرانی-انرژی، به جای دامنه تنش ها از تنش بیشینه استفاده نموده و صفحه ای با مقدار $\frac{\Delta \gamma}{\gamma} + \sigma_{n-\max} \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}$ بیشینه را به عنوان صفحه بحرانی در نظر می گیرد. همه پارامترهای رابطه این معیار، روی صفحه مربوطه لحاظ می شوند.

$$\Delta W^* = 1.02 \frac{\sigma'_f{}^2}{E} (\nu N_f)^{2b} + 1.04 \sigma'_f \epsilon'_f (\nu N_f)^{b+c} \quad (۸)$$

$$\Delta W^* = \left(\tau_{n-\max} \frac{\Delta \gamma}{\gamma} + \sigma_{n-\max} \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \right)_{\max}$$

فیزیک این مدل می کوشد، سهم هریک از تنش ها و کرنش های کششی و برشی را متوسط گیری نماید. در حالتی که بازه تنش برشی روی صفحه بحرانی صفر باشد، مدل چو و همکاران اثر تنش متوسط را در نظر نمی گیرد.

این معیار برای موادی مناسب است که در مود برشی گسیخته می شوند. در رابطه (۲)، S از خواص ماده و نشان دهنده اثر کرنش عمودی روی رشد ترک است. این پارامتر با انجام آزمایش پیچش با $\Delta \epsilon_n = 0$ به صورت رابطه زیر محاسبه می شود:

$$S = \frac{\frac{\tau'_f (\nu N_f)^{b\gamma-c}}{G} + \gamma'_f (\nu N_f)^{c(\gamma-1)} - (1+\nu) \frac{\sigma'_f}{E} (\nu N_f)^{b-c} - \epsilon'_f (1+\nu_p)}{(1-\nu) \frac{\sigma'_f}{E} (\nu N_f)^{b-c} + \epsilon'_f (1-\nu_p)} \quad (۳)$$

۲-۳- معیار فاطمی-سوشی

این معیار صفحه بازه کرنش برشی بیشینه را به عنوان صفحه بحرانی در نظر می گیرد. تفاوت این معیار با معیار بران-میلر، در نظر گرفتن اثر تنش عمودی روی صفحه بحرانی می باشد. رابطه این معیار به صورت زیر است:

$$\frac{\Delta \gamma}{\gamma} (1+k \frac{\sigma_{n-\max}}{\sigma_y}) = \frac{\tau'_f}{G} (\nu N_f)^{b\gamma} + \gamma'_f (\nu N_f)^{c\gamma} \quad (۴)$$

در این مدل، پارامتر k از خواص ماده بوده و اثر تنش عمودی روی رشد ترک را نشان می دهد. این پارامتر از رابطه زیر به دست می آید:

$$k = \left[\frac{\frac{\tau'_f}{G} (\nu N_f)^{b\gamma} + \gamma'_f (\nu N_f)^{c\gamma}}{1.13 \frac{\sigma'_f}{E} (\nu N_f)^b + 1.05 \epsilon'_f (\nu N_f)^c} \right] \frac{K'(\nu, \gamma)^n}{\sigma'_f (\nu N_f)^b} \quad (۵)$$

۲-۴- معیار اسمیت-واتسون-تاپر

این معیار صفحه بازه کرنش عمودی بیشینه را به عنوان صفحه بحرانی در نظر می گیرد. استفاده از رابطه (۶) و تعیین پارامترهای مربوطه روی صفحه بحرانی، عمر خستگی براساس معیار مزبور را به دست می دهد:

$$\sigma_{n-\max} \frac{\Delta \epsilon_n}{\epsilon} = \frac{\sigma'_f{}^2}{G} (\nu N_f)^{2b} + \sigma'_f \epsilon'_f (\nu N_f)^{b+c} \quad (۶)$$

این مدل برای موادی که تحت مود کششی آسیب می بینند، مناسب است. در نظر گرفتن تنش عمودی بیشینه روی صفحه بحرانی، سبب می شود، اثر تنش متوسط در این معیار وارد گردد.

۲-۷- معیار گلینکا-ونگ-پلامتری

این معیار یک معیار ترکیبی صفحه بحرانی- انرژی است و صفحه‌ای را در نظر می‌گیرد که بیشترین کار برشی را تحمل نماید. به عبارت دیگر، این مدل صفحه با بیشینه حاصل ضرب بازه تنش برشی در بازه کرنش برشی را به عنوان صفحه بحرانی در نظر می‌گیرد.

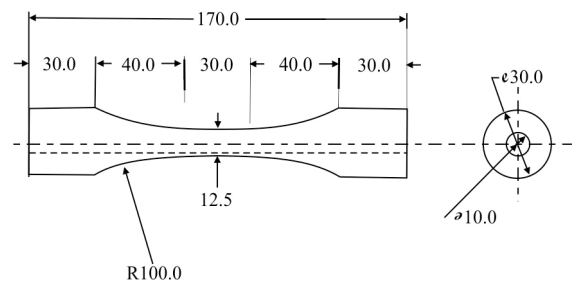
$$\Delta W^* = \left(\frac{\tau'_f}{G} (\gamma N_f)^{b\gamma} + \gamma'_f (\gamma N_f)^{b\gamma+c\gamma} \right) \left(1 + \frac{1}{1 - (\gamma N_f)^{2b\gamma}} \right)$$

$$\Delta W^* = \frac{\Delta \tau \Delta \gamma}{4} \left(\frac{\tau'_f}{\tau'_f - \tau_{n-\max}} + \frac{\sigma'_f}{\sigma'_f - \sigma_{n-\max}} \right) \quad (9)$$

مدل گلینکا و همکاران بر اساس کار برشی بوده و به کارگیری آن برای حالت عمر- کرنش برشی مناسب‌تر از حالت عمر- کرنش کششی است.

۳- داده‌های تجربی

مجموعه‌ای از آزمایش‌های واماندگی خستگی روی نمونه‌های فولادی SNCM630 تحت بارگذاری‌های نامتناسب محوری- پیچشی انجام شده است [۲]. شکل هندسی و ابعاد نمونه آزمایش در شکل (۱) و خواص مکانیکی این فولاد و نتایج آزمایش‌های در جداول (۱)، (۲) و (۳) ارائه شده است. آزمایش‌های شماره ۱ تا ۷ مربوط به بارگذاری محوری و شماره ۸ تا ۱۴ مربوط به بارگذاری پیچشی هستند.



شکل (۱) هندسه نمونه آزمایش‌ها، ابعاد برحسب میلی‌متر هستند [۲].

۴- تخمین عمر خستگی بر مبنای معیارهای مختلف

در این قسمت، با وارد کردن خواص مادی فولاد SNCM630 و نیز داده‌های مربوط به هر آزمایش در کد نوشته شده، عمر خستگی بر مبنای معیارهای مختلف محاسبه شده است. عمر خستگی تخمین زده شده توسط معیارهای چندمحوری با عمر خستگی تجربی مقایسه شده و قابلیت معیارها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نتایج مربوط به عمر خستگی تخمین زده شده توسط معیارهای

مختلف برای بارگذاری‌های محوری و پیچشی در جداول (۴) و (۵) و شکل (۲) آورده شده است. جدول (۴) شامل عمر تجربی (N_{fe})، عمر تخمینی هر معیار (N_{fip}) و جدول (۵) نسبت عمر تخمینی به تجربی (N_{fip}/N_{fe}) مربوط به هر آزمایش می‌باشد. همچنین، در هر یک از نمودارهای شکل (۲)، محورهای افقی و قائم به ترتیب نشان‌دهنده عمر تجربی و عمر تخمینی می‌باشند. نیمساز نمودارها نماینده حالت مطلوبی است که در آن عمر تجربی با عمر تخمینی برابر و لذا نسبت N_{fip}/N_{fe} برابر یک باشد. میزان مناسب بودن تخمین‌های هر معیار، از نزدیکی منحنی مربوطه به این نیمساز یا نزدیکی نسبت عمر تخمینی به تجربی به عدد ۱ قابل تشخیص است. بر این اساس، با بررسی جدول (۵) و نمودارهای شکل (۲) نتایج زیر درباره توانمندی معیارها آورده می‌شود:

جدول (۱) خواص مادی فولاد SNCM630 [۲].

σ'_f	۱۲۷۲	b	-۰/۰۷۳	γ'_f	۱/۵۱
τ'_f	۸۵۸	c	-۰/۸۲۳	K'	۱۰۵۶
E (GPa)	۱۹۶	b_γ	-۰/۰۶۱	n'	۰/۰۵۴
G (GPa)	۷۷	c_γ	-۰/۷۰۶	K_{FS}	۱/۵
ν	۰/۲۷۳	ϵ'_f	۱/۵۴	S_{BM}	۱/۲۹

جدول (۲) نتایج آزمایش‌های خستگی برای بارگذاری محوری [۲].

N_f	$\Delta \epsilon / 2 (\times 10^{-3})$	σ_{min} (MPa)	σ_{max} (MPa)	شماره آزمایش
۳۶۹	۹/۹۴	-۷۸۸	۷۵۱	۱
۵۹۱	۷/۹۴	-۸۱۷	۷۸۵	۲
۱۶۱۴	۵/۹۷	-۷۷۹	۷۵۱	۳
۲۵۹۶	۴/۹۶	-۷۶۹	۷۳۸	۴
۳۹۵۸	۳/۹۱	-۷۳۰	۷۱۶	۵
۳۰۵۲۹	۲/۹۳	-۷۱۰	۶۶۳	۶
۲۳۱۱۱۲	۲/۳۲	-۶۰۶	۵۶۳	۷

جدول (۳) نتایج آزمایش‌های خستگی برای بارگذاری پیچشی [۲].

N_f	$\Delta \gamma / 2 (\times 10^{-3})$	τ_{min} (MPa)	τ_{max} (MPa)	شماره آزمایش
۷۲۰	۱۷	-۴۶۳	۴۶۳	۸
۱۱۰۴	۱۴/۱۱	-۴۶۴	۴۶۳	۹
۲۷۶۹	۸/۹۸	-۴۴۵	۴۳۶	۱۰
۹۸۵۹	۷/۸۹	-۴۳۲	۴۳۵	۱۱
۲۳۰۹۲	۶/۹۲	-۴۲۲	۴۲۹	۱۲
۴۸۶۱۳	۵/۸	-۳۸۶	۴۰۴	۱۳
۱۶۲۵۶۶	۵/۳۸	-۳۷۱	۳۹۱	۱۴

جدول (۴) نتایج تخمین عمر معیارهای مختلف و معیار بهبود یافته

شماره آزمایش	N_{fe}	کرنش عمودی پیشینه	بران-میلر	فاطمی-سوشی	اسمیت-واتسون-تاپر	لیو کششی	لیو برشی	چو-کونلی-بانن	گلینکا-ونگ-پلامتری	معیار بهبود یافته	N_{fp}													
											۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
۳۱۳	۳۶۹	۴۲۶	۷۷۰	۷۴۴	۴۵۱	۴۳۳	۱۹۸۲	۴۷۵	۳۱۹۷	۳۱۳	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
۴۶۷	۵۹۱	۶۷۳	۱۳۵۷	۱۲۷۲	۶۲۰	۵۹۷	۳۳۵۱	۶۵۵	۵۰۰۲	۴۶۷	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	
۸۵۵	۱۶۱۴	۱۳۴۱	۳۵۰۸	۳۶۰	۱۲۰۴	۱۱۵۲	۱۱۰۲۲	۱۲۷۸	۱۸۳۱۴	۸۵۵	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴		
۱۴۲۸	۲۵۹۶	۲۳۵۸	۸۷۲۰	۷۷۵۰	۱۹۵۰	۱۸۴۳	۲۸۶۰۷	۲۰۷۸	۴۹۴۴۴	۱۴۲۸	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴			
۳۲۰۶	۳۹۵۸	۶۲۸۲	۵۱۹۴۰	۴۰۰۰۶	۴۲۱۸	۴۰۹۰	۱۵۶۸۰۰	۴۵۷۰	۲۷۹۰۱۵	۳۲۰۶	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴				
۱۶۴۸۶	۳۰۵۲۹	۴۸۱۶۷	۱۹۵۸۶۳۷	۱۸۶۳۰۰۰	۱۸۱۳۰	۱۵۴۲۸	۲۰۰۰۷۹۳	۲۰۱۵۴	۳۹۶۱۶۶۹	۱۶۴۸۶	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴					
۱۶۶۴۰۰	۲۳۱۱۱۲	۷۱۲۷۰۰	۴۵۴۹۳۸۷۵	۱۸۱۴۸۱۴۷۵	۱۷۱۳۰۰	۱۳۵۸۴۶	۴۷۷۸۸۵۳۸	۱۹۴۱۹۲	۱۳۷۱۲۵۲۰۱	۱۶۶۴۰۰	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴						
۷۴۴	۷۲۰	۵۸۱	۵۸۱	۷۴۴	۱۶۲۲	۱۶۲۳	۹۲۰	۴۳۵	۶۶۲	۷۴۴	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴							
۹۹۳	۱۱۰۴	۸۸۷	۸۸۷	۹۹۳	۲۶۴۰	۲۶۳۰	۱۴۱۶	۶۰۱	۹۴۳	۹۹۳	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴								
۴۲۰۰	۲۷۶۹	۳۳۹۲	۳۳۹۲	۴۲۰۰	۱۷۵۰۰	۱۶۶۸۲	۶۲۷۹	۱۷۵۳	۳۳۶۱	۴۲۰۰	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴									
۷۵۴۴	۹۸۵۹	۶۰۰۸	۶۰۰۸	۷۵۴۴	۳۴۱۸۸	۳۴۱۸۵	۱۱۱۰۸	۲۴۶۸	۵۱۵۴	۷۵۴۴	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴										
۱۵۹۴۲	۲۳۰۹۲	۱۲۷۰۰	۱۲۷۰۰	۱۵۹۴۲	۷۸۰۰۰	۸۱۸۷۵	۲۲۱۹۰	۳۷۷۸	۸۷۳۲	۱۵۹۴۲	۱۲	۱۳	۱۴											
۶۵۳۷۱	۴۸۶۱۳	۵۳۲۰۹	۵۳۲۰۹	۶۵۳۷۱	۳۴۳۶۰۰	۳۹۸۲۲۰	۹۳۶۲۵	۸۷۵۵	۲۸۳۰۲	۶۵۳۷۱	۱۳	۱۴												
۱۴۶۱۷۰	۱۶۲۵۶۶	۱۱۷۳۷۶	۱۱۷۳۷۶	۱۴۶۱۷۰	۷۰۰۴۰۰	۸۳۱۴۳۷	۱۹۸۱۵۵	۱۳۸۸۰	۵۳۶۲۰	۱۴۶۱۷۰	۱۴													

جدول (۵) نسبت عمر تخمینی به تجربی برای معیارهای مختلف و معیار بهبود یافته

شماره آزمایش	N_{fe}	کرنش عمودی پیشینه	بران-میلر	فاطمی-سوشی	اسمیت-واتسون-تاپر	لیو کششی	لیو برشی	چو-کونلی-بانن	گلینکا-ونگ-پلامتری	معیار بهبود یافته	N_{fp}/N_{fe}													
											۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
۰/۸۵	۳۶۹	۱/۱۵	۲/۱	۲	۱/۲۲	۱/۱۷	۵/۳۷	۱/۲۹	۸/۷۰	۰/۸۵	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
۰/۷۹	۵۹۱	۱/۱۴	۲/۳	۲/۱۵	۱/۰۵	۱/۰۱	۵/۶۷	۱/۱۱	۸/۵۰	۰/۷۹	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	
۰/۵۳	۱۶۱۴	۰/۸۳	۲/۲	۲/۱	۰/۷۵	۰/۷۲	۶/۸۲	۰/۷۹	۱۱/۳۰	۰/۵۳	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴		
۰/۵۵	۲۵۹۶	۰/۹۱	۳/۴	۲/۹۸	۰/۷۵	۰/۷۱	۱۱/۰۲	۰/۸۰	۱۹/۵	۰/۵۵	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴			
۰/۸۱	۳۹۵۸	۱/۵۶	۲۰	۱۰	۱/۰۶	۱/۰۳	۳۹/۶۱	۱/۱۵	۷۰/۵	۰/۸۱	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴				
۰/۵۴	۳۰۵۲۹	۱/۵۸	۶۴	۶۱	۰/۶۰	۰/۵۱	۶۵/۵۰	۰/۶۶	۱۲۹/۸	۰/۵۴	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴					
۰/۷۲	۲۳۱۱۱۲	۳/۰۸	۱۹۷	۷۸۵	۰/۷۴	۰/۵۹	۲۰۶/۷۷	۰/۸۴	۵۹۳	۰/۷۲	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴						
۱/۰۳	۷۲۰	۰/۸	۰/۹۶	۱/۰۳	۲/۲۵	۲/۲۵	۱/۲۸	۰/۶۱	۰/۹۲	۱/۰۳	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴							
۰/۹۰	۱۱۰۴	۰/۸	۰/۹۸	۰/۹۰	۲/۳۹	۲/۳۸	۱/۲۸	۰/۵۵	۰/۸۵	۰/۹۰	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴								
۱/۵۲	۲۷۶۹	۱/۲۲	۱/۸۱	۱/۵۲	۶/۳۱	۶/۰۲	۲/۲۷	۰/۶۴	۱/۲۱	۱/۵۲	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴									
۰/۷۶	۹۸۵۹	۰/۶۱	۱/۰۱	۰/۷۶	۳/۴۷	۳/۵۳	۱/۱۲	۰/۲۵	۰/۵۲	۰/۷۶	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴										
۰/۶۹	۲۳۰۹۲	۰/۵۵	۱/۱	۰/۶۹	۳/۳۸	۳/۵۴	۹۶	۰/۱۷	۰/۳۸	۰/۶۹	۱۲	۱۳	۱۴											
۱/۳۴	۴۸۶۱۳	۱/۱	۳/۰۶	۱/۳۴	۷/۰۶	۸/۱۹	۱/۹۲	۰/۱۸	۰/۵۸	۱/۳۴	۱۳	۱۴												
۰/۹۰	۱۶۲۵۶۶	۰/۷۲	۲/۲۷	۰/۹۰	۴/۳۱	۵/۱۱	۱/۲۲	۰/۰۹	۰/۳۳	۰/۹۰	۱۴													

• مشاهده می‌شود معیار کرنش عمودی پیشینه برای هر دو

نوع بارگذاری محوری و پیچشی عمر خستگی را با

تقریب مناسب به دست می‌دهد. به عبارت دیگر، این

معیار برای هر دو مود شکست کششی و برشی با دقت

خوبی عمر خستگی قطعه مورد بررسی را حساب

می‌نماید. معیارهای بران-میلر و فاطمی-سوشی، برای

بارگذاری پیچشی (مود شکست کششی)، عمر خستگی را

با تقریب مناسب به دست می‌دهند. ولی برای مود

و عمر محاسبه شده با آن‌ها غیرایمن است.

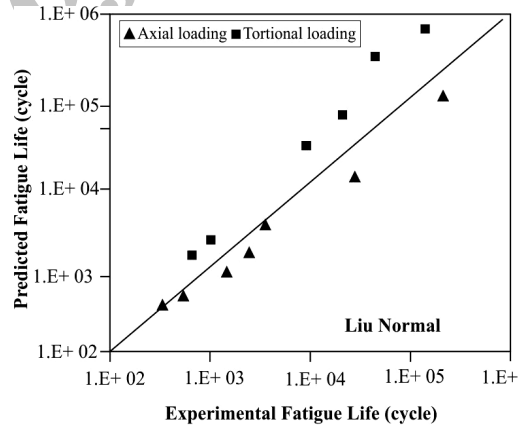
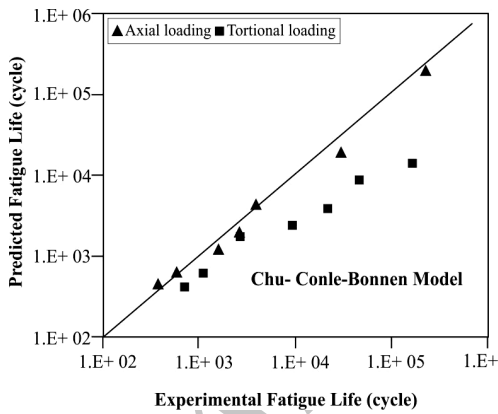
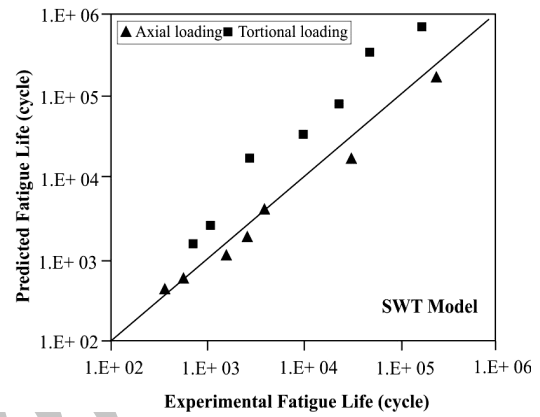
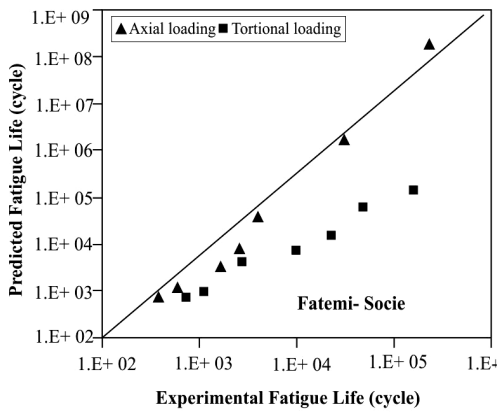
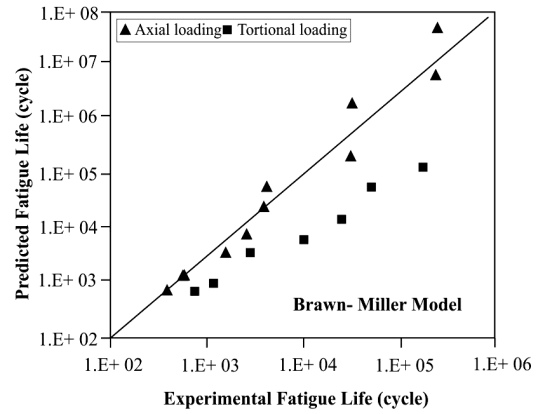
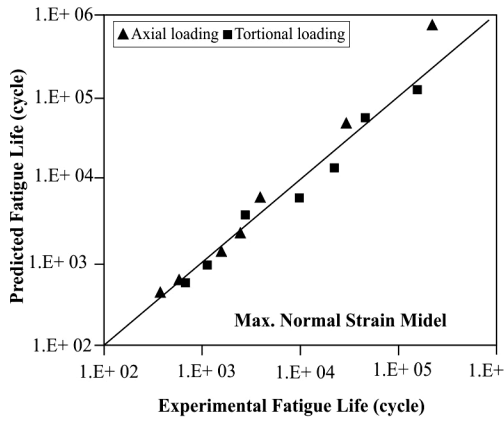
• معیار صفحه بحرانی اسمیت-واتسون-تاپر برای بارگذاری

محوری (مود شکست کششی) عمر خستگی را با تقریب

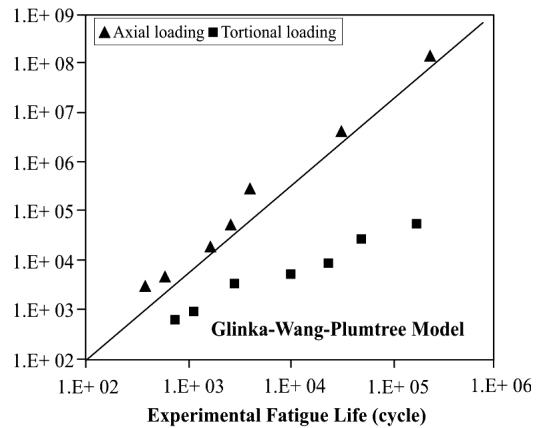
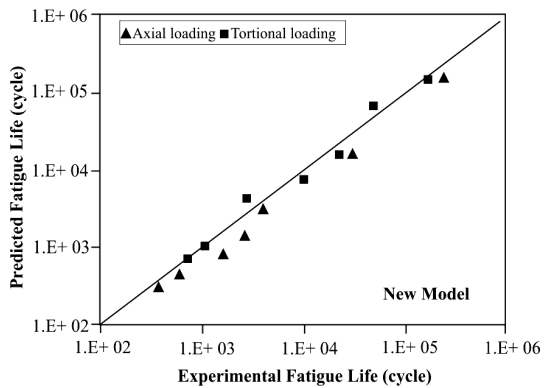
مناسب به دست می‌دهد. معیار مزبور برای مود شکست

برشی تا حدودی مناسب نمی‌باشد و عمر خستگی محاسبه

شده با آن نیازمند ضریب ایمنی بالایی است.



شکل (۲) مقایسه عمر خستگی تجربی با نتایج معیارهای مختلف خستگی چندمحوری.



شکل (۳) مقایسه عمر خستگی تجربی با نتایج معیار بهبود یافته.

است که مود واماندگی غالب در این معیارها مود برشی است. از سوی دیگر، معیار صفحه بحرانی اسمیت-واتسون-تاپر صفحه بازه کرنش عمودی بیشینه را به عنوان صفحه بحرانی در نظر می‌گیرد و برای مود شکست برشی مناسب است. مود واماندگی غالب در این معیار مود کششی است.

بر این اساس، استفاده از این معیارها به عنوان یک مدل محاسبه عمر خستگی چندمحوری، می‌تواند جواب‌های نادرستی را در پی داشته باشد. در صورتی که بتوان با اصلاح این معیارها، این نقیصه را در مدل‌های مربوطه مرتفع نمود، استفاده از مدل اصلاح شده برای محاسبه عمر خستگی چندمحوری، بدون ملاحظه مود شکست، فراگیرتر و راحت‌تر خواهد بود.

برای ارائه یک معیار اصلاح شده یا بهبود یافته که هر دو مود شکست کششی و برشی را شامل شده و عمرهای نزدیک به واقع را برای هر دو حالت تخمین بزند، همانند معیارهای صفحه بحرانی بران-میلر، فاطمی-سوشی و اسمیت-واتسون-تاپر، صفحه با کرنش برشی بیشینه به عنوان صفحه بحرانی در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر، برای بهبود مدل‌های صفحه بحرانی، با توجه به این که صفحه بحرانی کرنش برشی بیشینه در مدل‌های مربوط به هر دو مود کششی و برشی مورد استفاده قرار گرفته است، برای مدل فراگیر بهبودیافته نیز همین صفحه به عنوان صفحه بحرانی لحاظ شد. بدین ترتیب، عملاً اصلاح مدل‌های صفحه بحرانی محدود به داخل نمودن اثر پارامترهای مختلف روی صفحه بحرانی در رابطه عمر خستگی شده به گونه‌ای که در نهایت مدل ارائه شده برای هر دو مود کششی و برشی مناسب است.

بررسی‌های اولیه نشان داد که در صورتی که اثر کرنش عمودی و تنش عمودی روی صفحه بحرانی به طور همزمان در رابطه محاسبه عمر داخل شود، عمرهای نزدیک به واقع برای هر دو مود کششی و برشی قابل تخمین خواهد بود. به عبارت دیگر، رابطه محاسبه عمر خستگی معیار بهبودیافته به صورت زیر قابل بیان می‌باشد:

$$\frac{\Delta\gamma}{2} (1+k \frac{\sigma_{n-\max}}{\sigma_y}) + S \Delta\epsilon_n \quad (10)$$

$$= \frac{\tau'_f}{G} (\gamma N_f)^{b\gamma} + \gamma'_f (\gamma N_f)^{c\gamma}$$

- معیار کششی لیو برای بارگذاری محوری عمر خستگی را با تقریب مناسب به دست می‌دهد. می‌توان بیان داشت استفاده از این معیار به خصوص در خستگی با عمر زیاد برای مود شکست کششی از درجه اطمینان بالایی برخوردار می‌باشد. از سوی دیگر، مشاهده می‌شود، معیار برشی لیو برای بارگذاری پیچشی مناسب است و استفاده از آن برای بارگذاری محوری تا حدود زیادی ایمن نیست.

- معیار چو-کونلی-بانن برای هر دو مود شکست کششی و برشی دارای جواب‌های مناسبی است. خاطر نشان می‌سازد، دقت این معیار برای مود شکست کششی مناسب‌تر است، اما استفاده از آن برای هنگامی که مود شکست برشی باشد، از ضریب اطمینان بالاتری برخوردار است.

- معیار گالینکا و همکارانش برای بارگذاری پیچشی عمر خستگی را با تقریب مناسب به دست می‌دهد. از سوی دیگر، معیار مزبور برای مود شکست کششی مناسب نمی‌باشد و عمر خستگی محاسبه شده با آن بسیار بزرگتر از عمر خستگی مورد انتظار است.

۵- معرفی معیار بهبود یافته

روش‌های صفحه بحرانی بر مبنای شاهدات مربوط به جوانه‌زنی و رشد ترک‌ها حین بارگذاری‌های مربوطه استنتاج می‌شوند. در عمل، بنا به شرایط مختلف جنس ماده، حالت تنش، دامنه کرنش، محیط و غیره، عمر خستگی تحت تسلط رشد ترک در صفحه برشی یا صفحه کششی خواهد بود. بنابراین، مدل صفحه بحرانی شامل پارامترهای غالب بر هر دو نوع رشد ترک بوده و یک مدل صفحه بحرانی مناسب بایستی قادر باشد هم عمر خستگی و هم صفحه واماندگی غالب را پیش‌بینی نماید. معیارهای براون-میلر و فاطمی-سوشی صفحه با کرنش برشی بیشینه را به عنوان صفحه بحرانی در نظر می‌گیرند. از سوی دیگر، یکی از این معیارها اثر کرنش عمودی و دیگری اثر تنش عمودی روی صفحه بحرانی را، در رابطه محاسبه عمر خستگی داخل نموده‌اند. با توجه به نتایج بخش قبل، این معیارها برای مود شکست کششی مناسب نبوده و عمر خستگی محاسبه شده توسط این دو معیار بسیار بزرگتر از عمر خستگی تجربی است. دلیل این امر آن

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، ابتدا چند معیار مطرح در زمینه محاسبه عمر خستگی چندمحوری مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به نتایج به دست آمده یک مدل بهبودیافته ارائه شد. براساس نتایج به دست آمده، از میان معیارهای کرنش عمودی پیشینه، اسمیت- واتسون- تاپر و معیار کششی لیو که مناسب برای مصالح با شکست کششی هستند، معیار اسمیت-واتسون- تاپر تخمین عمر مناسب تری را نتیجه می دهد. همچنین، از میان معیارهای بران-میلر، فاطمی-سوشی، معیار برشی لیو، معیار گلینکا و همکاران که مناسب برای مصالح با مود شکست برشی هستند، معیار فاطمی-سوشی مناسب ترین تخمین عمر را دارد. از میان مدل های بررسی شده، معیار چو و همکاران و معیار کششی لیو تنها معیارهایی هستند که با یک ضریب اطمینان بالا قابل استفاده برای هر دو مود شکست کششی و برشی مناسبی هستند. مدل بهبودیافته که صفحه کرنش برشی پیشینه را صفحه بحرانی در نظر گرفته و تأثیر پارامترهای تنش و کرنش عمودی روی صفحه بحرانی را توأمان لحاظ می کند، با یک ضریب اطمینان مناسب برای هر دو مود شکست کششی و برشی مناسب بوده و ضعف موجود در مدل های مورد بررسی را برطرف می کند. در واقع، مدل بهبودیافته، ترکیب مدل های براون-میلر و فاطمی-سوشی است. کاربرد مهم این معیار در بارگذاری های خمشی-پیچشی و محوری-پیچشی است که ترکیب مود شکست محوری و پیچشی وجود دارد.

فهرست علائم

b	نمای مقاومت خستگی محوری
b_{γ}	نمای مقاومت خستگی پیچشی
c	نمای شکل پذیری خستگی محوری
c_{γ}	نمای شکل پذیری خستگی پیچشی
E	مدول الاستیسیته
G	مدول برشی
K'	ضریب مقاومت سیکلی
n'	نمای کرنش سختی سیکلی
N_f	عمر خستگی

همه پارامترهای رابطه (۱۰)، مربوط به صفحه بحرانی می باشند. برای ارزیابی دقت و کارایی معیار ارائه شده، با استفاده از داده های تنش و کرنش مربوط به آزمایش های واماندگی خستگی روی فولاد $SNCM630$ (جداول (۲) و (۳))، عمر خستگی بر مبنای رابطه معیار بهبودیافته محاسبه شده است. نتایج این محاسبه در جداول (۴) و (۵) و در شکل (۳) آورده شده است.

بررسی نتایج به دست آمده نشان می دهد که معیار بهبودیافته ارائه شده برای هر دو مود شکست کششی و برشی دارای جواب های مناسبی است. نکته مهم این است که عملاً با وارد شدن همزمان تنش و کرنش عمودی مربوط به صفحه بحرانی در رابطه محاسبه عمر خستگی، به واماندگی کششی نیز در کنار واماندگی برشی وزن لازم داده شده و عمرهای تخمینی در هر دو مود کششی و برشی با دقت بالایی منطبق بر عمرهای تجربی می شود. همان طور که از مقایسه شکل های (۲) و (۳) مشاهده می شود، مدل بهبودیافته علاوه بر این که دارای قابلیت تخمین عمر مناسب در هر دو مود کششی و برشی است، باعث بهبود عمر تخمینی در هر یک از مودها در مقایسه با مدل های بررسی شده نیز شده است. به عبارت دیگر، مثلاً مقایسه نتایج مدل بهبودیافته با مدل فاطمی-سوشی نشان می دهد که قابلیت مدل بهبودیافته در تخمین عمر مود برشی تنها برتری آن بر مدل فاطمی-سوشی نبوده و در مود کششی نیز (که توانایی مدل فاطمی-سوشی تخمین عمر در آن است)، دقت نتایج مدل بهبودیافته از مدل فاطمی-سوشی بیشتر است. این مسئله در مقایسه نتایج مدل بهبودیافته با سایر مدل ها نیز مشاهده می شود. بنابراین نتیجه می شود که در واماندگی های برشی و کششی همزمان در واماندگی جسم مؤثر بوده و اثر هیچکدام به طور کامل از بین نمی رود و با اختصاص وزن مناسب به هر کدام می توان عمر را با دقت بیشتری تخمین زد. دقت معیار بهبودیافته برای هر دو مود شکست کششی و برشی بسیار مناسب بوده اما استفاده از آن برای مود شکست کششی، نیاز به ضریب اطمینان بالاتری دارد. مهمترین مزیت معیار بهبودیافته نسبت به سایر معیارهای صفحه بحرانی، قابلیت آن در تخمین مناسب عمر خستگی نمونه های تحت بارهای توأم محوری و پیچشی است.

- [7] Chu C. C., Conle F. A. , Bonnen, J. F.,. Multiaxial stress-strain modeling and fatigue life prediction of SAE axel shaf, *ASTM STP 1191, American Society for Testing and Materials*, 1993, pp. 37-54.
- [8] Glinka G., Wang G., Plumtree A., Mean stress effects in multiaxial fatigue, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 18 (7/8), 1995, pp. 755-764.
- [9] Dowling N. E., Mechanical behavior of materials, 3st ed., Prentice Hall. 2006.

$\Delta \varepsilon$	بازه کرنش محوری
$\Delta \varepsilon_n$	بازه کرنش محوری بر روی صفحه بحرانی
$\Delta \gamma$	بازه کرنش برشی
$\Delta \gamma_n$	بازه کرنش برشی بر روی صفحه بحرانی
$\Delta \sigma_n$	بازه تنش محوری بر روی صفحه بحرانی
$\Delta \tau_n$	بازه تنش برشی بر روی صفحه بحرانی
ε'_f	ضریب شکل پذیری خستگی محوری
γ'_f	ضریب شکل پذیری خستگی پیچشی
ν	ضریب پواسون الاستیک
ν_p	ضریب پواسون پلاستیک
σ'_f	ضریب مقاومت خستگی محوری
σ_{n-max}	بیشینه تنش محوری بر روی صفحه بحرانی
σ_{n-mean}	میانگین تنش محوری بر روی صفحه بحرانی
τ'_f	ضریب مقاومت خستگی پیچشی

مراجع

- [1] Socie D. F. ,Marquis G. B., Multiaxial Fatigue, 1st ed., SAE,2000.
- [2] Han C., Chen X. , Kim K. S., Evaluation of multiaxial fatigue criteria under irregular loading, *Int. J. of Fatigue*, 24 (9), 2002, pp. 913-922.
- [3] Brown M., Miller K. A theory for fatigue failure under multiaxial stress-strain conditions, *Proceedings of Institute of Mechanical Engineers*, Vol. 187, 1973, pp. 745-756.
- [4] Fatemi A. ,Socie D. F., A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 11 (3), 1988, pp. 449-466.
- [5] Smith R. N., Watson P., Topper T. H., A stress strain parameter for the fatigue of metal, *Journal of Materials*, 5 (4), 1970, pp. 767-778.
- [6] Liu K. C., A method based on virtual strain-energy parameters for multiaxial fatigue life prediction, *ASTM STP 1191, American Society for Testing and Materials*, 1993, pp. 67-84.