بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

عنوان پایان‌نامه:

بررسی تغییر شکل‌های الاستیک-پلاستیک ورق‌های گرد مدرج تابعی تحت بارگذاری‌های مکانیکی و حرارتی

نگارنده:

محمد باقری اصل

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

استاد راهنما:

دکتر مهران کدخدایان

بهمن ۱۳۹۱

تائیدیه

گواهی می‌شود که این پایان‌نامه تاکنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده است و تمامی مطالب آن به جز مواردی که نام مرجع آورده شده است، نتیجه کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

دانشجو: محمد باقری اصل امضاء تاریخ

استاد راهنما: دکتر مهران کدخدایان امضاء تاریخ

بسمه تعالی

دانشگاه فردوسی مشهد

صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

جلسه دفاع از پایان نامه آقای **محمد باقری اصل** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک** گرایش **طراحی کاربردی** در ساعت ..... روز ..... در محل **کلاس ۲۱۱** دانشکده مهندسی با حضور امضا کنندگان ذیل تشکیل گردید. پس از بررسی های لازم، هیأت داوران پایان نامه نامبرده را با نمره به عدد ..... به حروف ..... و با **درجه** ..... مورد تأیید قرار داد.

عنوان رساله

بررسی تغییر شکل‌های الاستیک-پلاستیک ورق‌های گرد مدرج تابعی تحت بارگذاری‌های حرارتی و مکانیکی

هیئت داوران امضا

- **داور: دکتر سعید حدیدی مود**
  دانشیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد
- **داور: دکتر حمید اختراعی طوسی**
  دانشیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد
- **داور و نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر مجید معاونیان**
  استادیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد
- **استاد راهنما: دکتر مهران کدخدایان**
  استاد گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد
- **مدیر گروه: دکتر مجید نیازمند**
  استاد گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

تقدیم به پدر و مادر گرامیم:

آنانکه وجودم برایشان همه رنج بود و وجودشان برایم همه مهر.
توانشان رفت تا به توانایی برسم و مویشان سپید گشت تا رویم سپید بماند.
آنانکه فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان و روشنی رویشان سرمایه‌های جاودانی من است.
آنانکه راستی قامتم در شکستگی قامتشان تجلی یافت.
در برابر وجودشان زانوی ادب بر زمین می‌نهم و با دلی مملو از عشق و محبت و خضوع بر دستانشان بوسه می‌زنم.
سرو وجودشان همیشه سرسبز و استوار باد.

و

تقدیم به همه آنانکه به من آموختند

سپاس و تقدیر

قبل از هر چیز بر خود واجب می‌دانم که از زحمات گرانقدر استاد عزیز، جناب آقای دکتر مهران کدخدایان، به خاطر راهنمایی‌ها و حمایت‌هایشان در طول انجام مراحل مختلف کار تشکر و قدردانی کنم. از هیئت داوران محترم، جناب آقای دکتر سعید حدیدی و جناب آقای دکتر حمید اختراعی طوسی که زحمت مطالعه و داوری پایان‌نامه اینجانب را تقبل کردند کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین از نماینده تحصیلات تکمیلی جناب آقای دکتر مجید معاونیان سپاس گذاری می‌کنم.

همچنین از زحمات فراوان دکتر رضا باقری اصل که در تمام امور پژوهشی و گردآوری اطلاعات مرا یاری کردند کمال تشکر را دارم.

ضمناً از دوستان عزیزم مهندس محمد نجاتی و مهندس مسعود اسلامی مسرور به خاطر کمک‌هایشان در طول مراحل کار سپاس گزاری می‌کنم.

چکیده

بسمه تعالی

مشخصات پایان نامه تحصیلی مقطع کارشناسی ارشد

دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان پایان نامه: بررسی تغییر شکل‌های الاستیک-پلاستیک ورق‌های گرد مدرج تابعی تحت بارگذاری‌های حرارتی و مکانیکی

نام نویسنده: محمد باقری اصل

نام استاد راهنما: دکتر مهران کدخدایان

دانشکده: مهندسی	گروه: مکانیک	**رشته تحصیلی:** مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی
تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۴/۳		**تاریخ دفاع:**
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد ●	**دکتری** ○	**تعداد صفحات:**

چکیده پایان نامه:

آنچه که ملزم به انجام این پایان نامه شده است، مروری بر مقالات مربوط به فرآیندهای تغییر شکل ورق‌های مدرج تابعی در ۲۰ سال گذشته است. در این راستا به منظور دست‌یابی به یک مطالعه موفق، بررسی جامع پیرامون فرآیندهای تغییر شکل و رفتار الاستیک-پلاستیک مواد مدرج تابعی، امری ضروری و غیر قابل انکار است. نتایج حاصل از بررسی‌ها، عدم یک پیشینه پژوهش مشخص درباره توزیع تنش‌های الاستیک-پلاستیک انواع ورق‌های مدرج تابعی را گزارش می‌دهند. هدف از انجام این پایان نامه، بررسی رفتار الاستیک-پلاستیک ورق‌های گرد مدرج تابعی تحت بارگذاری‌های مکانیکی و حرارتی می‌باشد. بنابراین بمنظور تعیین رفتار دو فازی ورق مدرج تابعی، از قابلیت زیربرنامه نویسی (UMAT) نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS 6.10 استفاده شده است. برای فاز آلومینیوم به ترتیب دو رفتار مادی الاستیک-کاملا پلاستیک و مدل سخت شوندگی توانی در نظر گرفته شده است که با توزیع خطی و پیوسته به فاز الاستیک خطی سرامیک در سطح دیگر ورق تبدیل می‌شود. شرط تسلیم در کل ورق از معیار ون میسز تبعیت می‌کند. در شبیه‌سازی‌ها رفتار موثر تنش-کرنش مادی تابعی در ناحیه الاستیک از روش همگن‌سازی موری تاناکا بدست می‌آید و در ناحیه پلاستیک از قانون ترکیب متوسط (TTO) استفاده می‌شود. علاوه بر اثر مدل مادی فاز آلومینیوم بر توزیع تنش‌ها و کرنش‌های پلاستیک، تاثیر نوع همگن‌سازی، شرایط مرزی، دما و باربرداری نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بمنظور برقراری اطمینان از صحت زیربرنامه مقایسه‌ای با نتایج تحلیلی نیز انجام شده است که همخوانی مناسبی را گزارش می‌دهند. با مقایسه مقادیر بدست آمده درباره توزیع تنش‌ها و کرنش‌های پلاستیک حاصل از شبیه سازی ورق گرد مدرج تابعی تحت بارگذاری مکانیکی خالص، نتیجه می‌شود که تخمین رفتار مدل مادی الاستیک-کاملا پلاستیک برای ورق گرد مدرج تابعی مذکور در مقایسه با مدل سخت شوندگی نتایج مطلوبی را به همراه نخواهد داشت. ضمنا حضور سرامیک در ورق گرد به عنوان یک ماده مقاوم حرارتی مناسب در تحمل تنش‌های حرارتی و مکانیکی تلقی می‌شود.

کلید واژه:

۱. مواد مدرج تابعی
۲. ترموالاستیک-پلاستیک
۳. المان محدود
۴. بارگذاری حرارتی و مکانیکی

امضای استاد راهنما:.....

تاریخ:.....

فهرست

فهرست نشانه‌ها v

فهرست نمودارها و آرایه‌ها ix

فهرست جداول xiii

فصل اول: مقدمه ۲

فصل دوم: تاریخچه ۷

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲ مرور مقالات ۹

۲-۲-۱ همگن‌سازی مواد مدرج تابعی ۹

۲-۲-۲ انتقال حرارت در مواد مدرج تابعی ۱۱

۲-۲-۳ تحلیل تنش در مواد ناهمگن تحت بارگذاری حرارتی، استاتیکی و دینامیکی ۱۲

فصل سوم: مبانی ترموالاستیک-پلاستیک مواد مدرج تابعی ۲۸

۳-۱ مقدمه ۲۸

۳-۲ مقدمه‌ای بر رفتار ترموالاستیک مواد مدرج تابعی ۲۹

۳-۳ تئوری‌های مختلف در همگن‌سازی الاستیک مواد کامپوزیتی مدرج تابعی ۳۱

۳-۳-۱ روش موری تاناکا ۳۶

۳-۳-۲ روش خودسازگار ۳۸

۳-۳-۳ قانون ترکیب خطی ۳۹

۳-۴ مبانی پلاستیسیته در مواد مدرج تابعی ۳۹

۳-۴-۱ تئوری پلاسیسیته مواد ناهمگن ۴۱

۳-۴-۲ مدل‌های منحنی تنش و کرنش ۴۲

۳-۴-۳ نمودارهای ریاضی تنش-کرنش موثر در یک ماده مدرج تابعی ۴۴

۳-۴-۳-۱ الاستیک-کاملا پلاستیک ۴۴

۳-۴-۳-۲ مدل سخت شوندگی خطی ۴۶

۳-۴-۳-۳ مدل سخت شوندگی غیر خطی توانی ۴۷

فصل چهارم: انتگرال‌گیری عددی از معادلات حاکم و الگوریتم برنامه نویسی ۵۱

۴-۱ مقدمه ۵۱

۴-۲ معادلات حاکم ۵۲

۴-۲-۱ تابع تسلیم ون میسز ۵۳

۴-۲-۲ سخت شوندگی ۵۸

۴-۲-۳ مدل توانی ۵۹

۴-۳ میکروساختار ماده مدرج تابعی آلومینیوم-سرامیک ۶۰

۴-۳-۱ توزیع کسر حجمی فازهای تشکیل دهنده ۶۱

۴-۳-۲ میکروساختار ماده در ناحیه الاستیک ۶۲

۴-۳-۳ نمودار تنش-کرنش موثر ماده مدرج تابعی (رفتار پلاستیک ماده مدرج تابعی) ۶۲

۴-۳-۴ متغیرهای موثر حرارتی ۶۶

۴-۴ انتگرال‌گیری عددی الاستیک-پلاستیک ۶۷

۴-۴-۱ به‌روز کردن حالت تنش ۶۸

۴-۵ زیربرنامه حرارتی ۷۴

فصل پنجم: تغییر شکل‌های ترموالاستیک-پلاستیک استوانه‌ها (بررسی نتایج تحلیلی) ۷۷

۵-۱ مقدمه ۷۷

۵-۲ اعتبار سنجی UMAT با مقاله اراسلان ۸۰

۵-۳ مقاله آزتورک ۸۳

فصل ششم: خمش الاستیک-پلاستیک ورق‌های گرد مدرج تابعی ۸۷

۶-۱ تکیه گاه گیردار کامل ۸۹

۶-۱-۱ مقایسه توزیع تنش و جابجایی‌ها برای کسر حجمی متفاوت سرامیک و آلومینیوم برای ورق‌های الاستیک-کاملا پلاستیک ۹۰

۶-۱-۲ توزیع تنشهای پسماند پس از باربرداری برای مواد الاستیک-کاملا پلاستیک ۹۳

۶-۱-۳ مقایسه توزیع تنش و جابجایی بین مدل RM و مدل TTO برای مواد الاستیک-کاملا پلاستیک ۹۴

۶-۱-۴ مقایسه توزیع تنش و جابجایی‌ها نسبت به کسر حجمی برای ورق‌های با سخت شوندگی توانی ۹۹

۶-۱-۵ توزیع تنش‌های پسماند پس از باربرداری برای ورق‌های با سخت شوندگی توانی..... ۱۰۲

۶-۱-۶ مقایسه توزیع تنش و جابجایی در دو حالت RM و مدل TTO برای مواد سخت شونده۱۰۳

۶-۲ تکیه گاه ساده ثابت..... ۱۰۷

۶-۲-۱ مقایسه توزیع تنش و جابجایی در لایه‌های مختلف برای ورق‌های الاستیک-کاملا پلاستیک ۱۰۷

۶-۲-۲ توزیع تنش‌های پسماند و مقایسه آن در لایه‌های مختلف برای ورق‌های الاستیک-کاملا پلاستیک مدرج تابعی ۱۱۱

۶-۲-۳ مقایسه توزیع تنش و جابجایی در دو حالت RM و مدل TTO برای مواد الاستیک-کاملا پلاستیک ۱۱۴

۶-۲-۴ مقایسه توزیع تنش و جابجایی‌ها برای کسر حجمی متفاوت سرامیک و آلومینیوم برای ورق‌های با سخت شوندگی توانی ۱۱۷

۶-۲-۵ توزیع تنش‌های پسماند پس از باربرداری برای ورق‌های با سخت شوندگی توانی..... ۱۱۸

۶-۳ تکیه گاه ساده با قابلیت حرکت شعاعی ۱۲۰

۶-۳-۱ مقایسه توزیع تنش و جابجایی‌ها برای کسر حجمی متفاوت سرامیک و آلومینیوم برای ورق های الاستیک-کاملا پلاستیک ۱۲۰

۶-۳-۲ توزیع تنش‌های پسماند و مقایسه آن در لایه‌های مختلف برای ورق‌های الاستیک-کاملا پلاستیک مدرج تابعی ۱۲۳

فصل هفتم: تغییر شکلهای ترموالاستیک-پلاستیک ورقهای گرد مدرج تابعی ۱۲۶

۷-۱ تکیه‌گاه گیردار ۱۲۸

۷-۱-۱ مقایسه تغییر شکل‌های ترموالاستیک-پلاستیک ورق در چهار دمای ۳۳۰، ۴۳۰، ۶۳۰ و ۸۳۰ درجه کلوین سطح سرامیک برای ورق‌های با سخت شوندگی توانی ۱۲۸

۷-۲ تکیه‌گاه ساده ثابت ۱۳۷

۷-۲-۱ مقایسه تغییر شکل‌های ترموالاستیک-پلاستیک ورق در چهار دمای ۳۳۰، ۴۳۰، ۶۳۰ و ۸۳۰ درجه کلوین سطح سرامیک برای ورق‌های با سخت شوندگی توانی ۱۳۷

فصل هشتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۵۰

۸-۱ نتیجه‌گیری ۱۵۰

۸-۲ پیشنهادات ۱۵۴

مراجع ۱۵۶

ضمائم: ۱۶۴

فهرست نشانه‌ها

نمادها

C	ماتریس الاستیسیته
C^*	تانسور اسمی الاستیسیته
E	مدول الاستیسیته
E_c	مدول الاستیسیته فاز سرامیک
E_{eff}	مدول الاستیسیته موثر
E_m	مدول الاستیسیته فاز فلز
E_t	مدول مماسی
G	مدول برشی موثر
G_c	مدول برشی فاز سرامیک
G_m	مدول برشی فاز فلز
H	مشتق تابع تسلیم نسبت به کرنش پلاستیک معادل، مدول پلاستیک
H_{eff}	مدول پلاستیک موثر
H_T	مشتق تابع تسلیم نسبت به دما
J	ژاکوبین
K	مدول حجمی
K_c	مدول حجمی فاز فلز
K_m	مدول حجمی فاز سرامیک
P_j	متغییر میدانی
P_3	ضریب پنجم متغییر میدانی روش خود سازگار
P_2	ضریب چهارم متغییر میدانی روش خودسازگار
P_1	ضریب سوم متغییر میدانی روش خودسازگار
P_0	ضریب دوم متغییر میدانی روش خودسازگار
P_{-1}	ضریب اول متغییر میدانی روش خودسازگار
R	مشتق تابع تسلیم نسبت به مولفه‌های تنش
T	دما
T_n	دما در ابتدای بازه زمانی
T_{n+1}	دما در انتهای بازه زمانی
V	حجم

V_c	کسر حجمی فاز سرامیک
V_m	کسر حجمی فاز فلز
Z	مولفه سوم دستگاه مختصات عمومی
dt	جزء زمان
dT	جزء دما
dv	جزء حجم
f_1	ضریب اصلاح شوندگی روش موری-تاناکا
i	شمارنده جمع
k	ضریب سخت شوندگی
n	توان سختی موثر
n_0	توان سختی فاز فلز
q	ضریب انتقال تنش به کرنش
r	تابع سخت شوندگی
t	زمان
v	حجم
v_c	حجم فاز سرامیک
v_m	حجم متوسط
x	تانسور انتقال سطح تسلیم، مولفه اول مختصات
x_n	تانسور انتقال سطح تسلیم در ابتدای بازه زمانی
x_{n+1}	تانسور انتقال سطح تسلیم در انتهای بازه زمانی
y	مولفه دوم دستگاه مختصات دکارتی
z	مولفه سوم دستگاه مختصات دکارتی

علائم یونانی

α_i	مولفه ضریب انبساط حرارتی
α_m	ضریب انبساط حرارتی موثر
ε^*	کرنش اسمی
$\hat{\varepsilon}^*$	کرنش میدانی اسمی
ε^e	کرنش الاستیک
ε^{th}	کرنش حرارتی
ε^p	کرنش پلاستیک
$\dot{\varepsilon}$	نرخ کرنش

$d\varepsilon^T$	جزء کرنش حرارتی
$d\varepsilon^{th}$	جزء کرنش حرارتی
$d\varepsilon^p$	جزء کرنش پلاستیک
ε_{n+1}^p	مولفه کرنش پلاستیک در انتهای بازه زمانی
$\hat{\varepsilon}_m$	کرنش میدانی متوسط
ε_i	مولفه تانسوری کرنش
ε_{ap}	کرنش اعمالی
ε_0	کرنش باقیمانده
$\bar{\varepsilon}^p$	کرنش پلاستیک معادل
ε_Y	کرنش تسلیم
$\bar{\varepsilon}$	کرنش معادل
$\bar{\varepsilon}^p$	کرنش پلاستیک معادل
η	ضریب خود سازگار
δ	جزء جابجایی
δ_{ij}	دلتای کرونکر
σ	تنش
σ_m	تنش متوسط
σ_0	تنش تسلیم فاز فلز
$\bar{\sigma}$	تنش معادل
$\hat{\sigma}^*$	تنش اسمی میدانی
$\hat{\sigma}_m$	تنش اسمی متوسط
σ_{n+1}	تنش در انتهای بازه زمانی
σ^{tr}	تانسور تنش انحرافی
σ_Y	تنش تسلیم موثر
σ_{ij}	تانسور تنش
$\hat{\sigma}_i$	تانسور تنش میدانی
σ_m	تنش متوسط، تنش هیدرواستاتیک
σ_f	تابع تنش
σ_i'	مولفه تنش انحرافی
λ	ضریب مادی، ضریب تناسب
$d\lambda$	جزء ضریب تناسب
r_σ	باقیمانده تابع تنش
r_ϕ	باقیمانده تابع تسلیم

$\dot{\lambda}$	نرخ ضریب مادی
ϕ	تابع تسلیم
$\Delta\lambda$	تغییرات ضریب مادی، تغییرات جزء کرنش پلاستیک معادل
$\Delta\varepsilon^{p}$	اختلاف کرنش پلاستیک
$\Delta\bar{\varepsilon}^{p}$	اختلاف کرنش پلاستیک معادل
$\Delta\varepsilon$	اختلاف تنش
$\Delta\sigma^{pc}$	اختلاف تنش تقریب زن
$\Delta\varepsilon^{th}$	اختلاف کرنش حرارتی
$\{v\}$	بردار باقیمانده وزنی روش CPPM
$\{r\}$	بردار باقیمانده تنش و کرنش پلاستیک معادل در روش CPPM

فهرست نمودارها و آرایه‌ها

شکل ۳-۱ مدل تحلیلی برای یک ماده FGM، الف-تغییرات پیوسته، ب- تغییرات لایه‌ای
شکل ۳-۲ الف- نمای یک ماده تابعی ذره سرامیک داخل ماتریس فلز، ب- کامپوزیت سرامیک فلز لایه‌ای
شکل ۳-۳ میکروساختار اسکلتی یک ماده تابعی
شکل ۳-۴ نمودار شماتیک تنش کرنش موثر برای یک ماده تابعی
شکل ۳-۵ نمودار تنش کرنش برای کامپوزیت تابعی الاستیک-کاملا پلاستیک
شکل ۳-۶ نمودار تنش کرنش ماده تابعی که فاز فلز رفتار الاستیک-کاملا پلاستیک دارد
شکل۳-۷ نمودار تنش کرنش دوخطی برای کامپوزیت تابعی
شکل ۴-۱ سطح تسلیم ون-میسز همراه با جهت کرنش‌های پلاستیک
شکل ۴-۲ جابجایی سطح تسلیم با درنظر گرفتن اثر باشینگر
شکل ۴-۳ نمودار تنش کرنش سوپر آلومینیوم در دماهای مختلف، شرایط استاتیکی بوده و نمودارها توسط Johnson و Slater ارائه شده است. $\dot{\varepsilon} = 10^{-3}/s$
شکل ۴-۴ تغییرات توزیع کسر حجمی سرامیک و آلومینیوم با تغییر در توان کسر حجمی
شکل ۴-۵ تعیین شماتیک ضریب انتقال تنش کرنش q
شکل ۴-۶ فرآیند بازگشت تنش روی سطح تسلیم توسط روش CPPM
شکل ۴-۷ مدل مادی تابعی و پیاده‌سازی آن در کد المان محدود
شکل ۴-۸ نمایش الگوریتم بازگشتی برای انتگرال گیری ضمنی الاستیک-پلاستیک
شکل ۵-۱ تست کشش تک محوره در یک تک المان
شکل ۵-۲ مقایسه نمودار تنش کرنش واقعی با نتایج حاصله از UMAT
شکل ۵-۳ نمایش مدل شبیه‌سازی شده با شرایط مرزی مقاله اراسلان در ABAQUS
شکل ۵-۴ مدل اجزاء محدود استوانه تابعی
شکل ۵-۵ توزیع تنش‌های حدی در راستای ضخامت برای $\bar{p} = 0.2734$
شکل ۵-۶ توزیع تنش‌ها در حالتی که لوله تسلیم شده است
شکل ۵-۷ توزیع کرنش‌های پلاستیک شعاعی و محیطی نسبت به شعاع بی بع
شکل ۵-۸ نمودار توزیع تنش نسبت به شعاع برای رفتار مادی الاستیک-کاملا پلاستیک و توزیع کسر حجمی خطی
شکل ۵-۹ نمودار توزیع تنش برای رفتار مادی سخت شوندگی خطی و توزیع کسر حجمی خطی
شکل ۵-۱۰ نمودار توزیع کرنش پلاستیک شعاعی و محیطی برای دو رفتار مادی پلاستیک کامل و سخت شوندگی خطی
شکل ۵-۱۱ نمایش مدل استوانه FGM بلند با دو انتهای ثابت
شکل ۵-۱۲ توزیع تنش در راستای شعاع استوانه برای $\bar{q} = 4$
شکل ۵-۱۳ توزیع کرنش پلاستیک در راستای استوانه برای $\bar{q} = 4$
شکل ۶-۱ ورق گرد تابعی با تغییرات پیوسته خواص در جهت ضخامت
شکل ۶-۲ مدل سه بعدی اجزاء محدود ورق گرد تابعی
شکل ۶-۳ مقایسه توزیع تنش معادل در درصد کسرحجمی مختلف آلومینیوم و سرامیک
شکل ۶-۴ مقایسه توزیع تنش شعاعی در تکیه گاه گیردار کامل
شکل۶-۵ مقایسه توزیع تنش محیطی در لایه‌های مختلف

شکل ۶-۶ مقایسه توزیع تنش‌های ضخامت نسبت به شعاع ورق در لایه‌های مختلف
شکل ۶-۷ توزیع کرنش پلاستیک شعاعی در درصد کسرحجمی مختلف آلومینیوم و سرامیک
شکل۶-۸ توزیع کرنش پلاستیک محیطی در درصد کسر حجمی مختلف ورق آلومینیوم و سرامیک
شکل ۶-۹ مقایسه توزیع کرنش پلاستیک ضخامت در لایه‌های مختلف
شکل ۶-۱۰ توزیع کرنش پلاستیک معادل در درصد کسر حجمی مختلف آلومینیوم و سرامیک
شکل ۶-۱۱ مقایسه توزیع تنش پسماند معادل، ماکزیمم و مینیمم نسبت به توزیع فازی ماده
شکل ۶-۱۲ مقایسه توزیع تنش پسماند مولفه‌ای در راستای ضخامت
شکل ۶-۱۳ مقایسه خیز باقیمانده ورق FGM با حالت بارگذاری
شکل ۶-۱۴ مقایسه توزیع تنش معادل با حالت قانون ترکیب خطی الف-منطقه سرامیک خالص ب-۸۰٪ سرامیک ج-ترکیب ۶۰٪ سرامیک د-۶۰٪ آلومینیوم ه-۸۰٪ آلومینیوم ی-منطقه آلومینیوم خالص
شکل ۶-۱۵ مقایسه توزیع تنش ماکزیمم الف-۱۰۰٪ و ۸۰٪ سرامیک ب-۶۰٪ و ۴۰٪ سرامیک ج-۸۰٪ و ۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۶-۱۶ مقایسه توزیع تنش مینیمم الف-۱۰۰٪ و ۸۰٪ سرامیک ب-۶۰٪ و ۴۰٪ سرامیک ج-۸۰٪ و ۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۶-۱۷ مقایسه توزیع کرنش پلاستیک معادل الف-۱۰۰٪ و ۸۰٪ سرامیک ب-۶۰٪ و ۴۰٪ سرامیک ج-۸۰٪ و ۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۶-۱۸ مقایسه خیز ماکزیمم ورق بعد از باربرداری و بارگذاری بین مدل RM و TTO
شکل ۶-۱۹ مقایسه توزیع تنش معادل در درصد کسرحجمی مختلف آلومینیوم و سرامیک
شکل ۶-۲۰ مقایسه توزیع تنش شعاعی در تکیه گاه گیردار کامل
شکل۶-۲۱ مقایسه توزیع تنش محیطی در لایه‌های مختلف
شکل ۶-۲۲ مقایسه توزیع تنش‌های ضخامت نسبت به شعاع ورق در لایه‌های مختلف
شکل ۶-۲۳ توزیع کرنش پلاستیک شعاعی در درصد کسرحجمی مختلف آلومینیوم و سرامیک
شکل۶-۲۴ توزیع کرنش پلاستیک محیطی در درصد کسر حجمی مختلف ورق آلومینیوم و سرامیک
شکل ۶-۲۵ مقایسه توزیع کرنش پلاستیک ضخامت در لایه‌های مختلف
شکل ۶-۲۶ توزیع کرنش پلاستیک معادل در درصد کسر حجمی مختلف آلومینیوم و سرامیک
شکل ۶-۲۷ مقایسه توزیع تنش پسماند معادل، ماکزیمم و مینیمم نسبت به توزیع فازی ماده
شکل ۶-۲۸ مقایسه توزیع تنش پسماند مولفه‌ای در راستای ضخامت
شکل۶-۲۹ مقایسه خیز باقیمانده ورق FGM با حالت بارگذاری
شکل ۶-۳۰ مقایسه توزیع تنش معادل با حالت قانون ترکیب خطی الف-منطقه سرامیک خالص ب-۸۰٪ سرامیک ج-ترکیب ۶۰٪ سرامیک د-۶۰٪ آلومینیوم ه-۸۰٪ آلومینیوم ی-منطقه آلومینیوم خالص
شکل ۶-۳۱ مقایسه توزیع تنش ماکزیمم الف-۱۰۰٪ و ۸۰٪ سرامیک ب-۶۰٪ و ۴۰٪ سرامیک ج-۸۰٪ و ۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۶-۳۲ مقایسه توزیع تنش مینیمم الف-۱۰۰٪ و ۸۰٪ سرامیک ب-۶۰٪ و ۴۰٪ سرامیک ج-۸۰٪ و ۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۶-۳۳ مقایسه توزیع کرنش پلاستیک معادل الف-۱۰۰٪ ، ۸۰٪، ۶۰٪ و ۴۰٪ سرامیک ب-۸۰٪ و ۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۶-۳۴ مقایسه خیز ماکزیمم ورق بعد از باربرداری و بارگذاری بین مدل RM و TTO
شکل ۶-۳۵ توزیع تنش‌های پسمانده باقیمانده برای مدل RM در راستای شعاعی

شکل ۶-۳۶ مقایسه توزیع تنش معادل در لایه‌های مختلف ورق در راستای شعاعی
شکل۶-۳۷ مقایسه توزیع تنش ماکزیمم در لایه‌های مختلف در راستای شعاعی
شکل ۶-۳۸ مقایسه توزیع تنش مینیمم در لایه‌های مختلف ورق در راستای شعاعی
شکل ۶-۳۹ توزیع کرنش پلاستیک شعاعی در نواحی مختلف توزیع آلومینیوم
شکل ۶-۴۰ توزیع کرنش پلاستیک محیطی برای لایه‌های مختلف
شکل ۶-۴۱ توزیع کرنش پلاستیک ضخامت در لایه‌های مختلف
شکل ۶-۴۲ مقایسه توزیع کرنش پلاستیک معادل برای درصدهای مختلف کسر حجمی فازهای تشکیل دهنده
شکل ۶-۴۳ توزیع مولفه تنش ماکزیمم، مینیمم و معادل در راستای ضخامت
شکل ۶-۴۴ توزیع مولفه‌های کرنش پلاستیک در راستای ضخامت
شکل ۶-۴۵ توزیع مولفه تنش‌های شعاعی و محیطی و ضخامت در راستای ضخامت مرکز ورق
شکل ۶-۴۶ توزیع تنش پسماند معادل در راستای شعاعی
شکل ۶-۴۷ توزیع تنش ماکزیمم باقیمانده در جهت شعاعی
شکل ۶-۴۸ توزیع تنش مینیمم باقیمانده در جهت شعاعی ورق
شکل ۶-۴۹ توزیع تنش شعاعی باقیمانده در جهت شعاعی
شکل ۶-۵۰ توزیع تنش محیطی باقیمانده در جهت شعاعی ورق
شکل۶-۵۱ توزیع تنش‌های پسماند در راستای ضخامت برای مواد الاستیک-کاملا پلاستیک
شکل ۶-۵۲ مقایسه خیز ماکزیمم قبل و بعد از باربرداری
شکل ۶-۵۳ مقایسه توزیع تنش معادل با حالت قانون ترکیب خطی الف-منطقه سرامیک خالص ب-۸۰٪ سرامیک ج-ترکیب ۶۰٪ سرامیک د-۶۰٪ آلومینیوم ه-۸۰٪ آلومینیوم ی-منطقه آلومینیوم خالص
شکل ۶-۵۴ مقایسه توزیع کرنش پلاستیک معادل الف- توزیع کرنش تا کسر حجمی ۸۰٪ آلومینیوم ب-توزیع کسر حجمی تا ۱۰۰٪ سرامیک
شکل ۶-۵۵ مقایسه توزیع تنش ماکزیمم الف-۱۰۰٪ و ۸۰٪ سرامیک ب-۶۰٪ و ۴۰٪ سرامیک ج-۸۰٪ و ۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۶-۵۶ مقایسه توزیع تنش مینیمم الف-۱۰۰٪ و ۸۰٪ سرامیک ب-۶۰٪ و ۴۰٪ سرامیک ج-۸۰٪ و ۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۶-۵۷ تاثیر توزیع مواد بر تنش معادل در راستای شعاعی
شکل ۶-۵۸ اثر توزیع مواد بر توزیع کرنش پلاستیک معادل
شکل ۶-۵۹ توزیع تنش‌های معادل، ماکزیمم و مینیمم در راستای ضخامت ورق در مرکز
شکل ۶-۶۰ توزیع تنش‌های مولفه‌ای در راستای ضخامت ورق در مرکز
شکل ۶-۶۱ توزیع مولفه‌های کرنش پلاستیک در راستای ضخامت ورق در مرکز
شکل ۶-۶۲ توزیع تنش پسماند معادل در راستای شعاعی
شکل ۶-۶۳ توزیع تنش پسماند ماکزیمم در راستای شعاعی
شکل ۶-۶۴ توزیع تنش باقیمانده مینیمم در راستای شعاعی
شکل ۶-۶۵ توزیع تنش باقیمانده شعاعی در راستای شعاع ورق
شکل۶-۶۶ توزیع تنش محیطی باقیمانده در راستای شعاعی
شکل ۶-۶۷ نمودار توزیع تنش‌های باقیمانده معادل، ماکزیمم و مینیمم در راستای ضخامت
شکل ۶-۶۸ توزیع تنش مولفه‌ای باقیمانده در راستای ضخامت ورق
شکل ۶-۶۹ مقایسه توزیع تنش معادل در راستای شعاع

شکل ۶-۷۰ مقایسه توزیع تنش شعاعی در راستای شعاع
شکل ۶-۷۱ مقایسه توزیع تنش محیطی در راستای شعاع
شکل ۶-۷۲ مقایسه توزیع کرنش پلاستیک شعاعی
شکل ۶-۷۳ مقایسه توزیع کرنش پلاستیک محیطی
شکل ۶-۷۴ مقایسه توزیع کرنش پلاستیک ضحامت
شکل ۶-۷۵ توزیع کرنش پلاستیک معادل در راستای شعاعی
شکل ۶-۷۶ مقایسه توزیع تنش اصلی ماکزیمم
شکل ۶-۷۷ مقایسه توزیع تنش اصلی مینیمم در راستای شعاعی ورق
شکل ۶-۷۸ توزیع تنش پسماند معادل در راستای شعاعی
شکل ۶-۷۹ توزیع تنش پسماند ماکزیمم در راستای شعاعی
شکل ۶-۸۰ توزیع تنش باقیمانده مینیمم در راستای شعاعی
شکل ۶-۸۱ توزیع تنش باقیمانده شعاعی در راستای شعاع ورق
شکل۶-۸۲ توزیع تنش محیطی باقیمانده در راستای شعاعی
شکل ۶-۸۳ نمودار توزیع تنش‌های باقیمانده معادل، ماکزیمم و مینیمم در راستای ضخامت
شکل ۶-۸۴ توزیع تنش مولفه‌ای باقیمانده در راستای ضخامت ورق
شکل ۷-۱ توزیع تنش‌های معادل در راستای شعاعی، الف- ۱۰۰٪ سرامیک ب-۶۵٪ سرامیک ج-۳۵٪ سرامیک د-۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۷-۲ نمودار توزیع تنش شعاعی، الف- ۱۰۰٪ سرامیک ب-۶۵٪ سرامیک ج-۳۵٪ سرامیک د-۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۷-۳ مقایسه توزیع تنش محیطی در دماهای مختلف، الف-۱۰۰٪ سرامیک ب- ۶۵٪ سرامیک ج-۳۵٪ سرامیک د-۱۰۰ آلومینیوم
شکل ۷-۴ مقایسه توزیع تنش ضخامت در دماهای مختلف، الف- لایه بالایی (۱۰۰٪ سرامیک) ب- لایه پایینی (۱۰۰٪ آلومینیوم)
شکل ۷-۵ مقایسه توزیع کرنش پلاستیک شعاعی در دماهای مختلف الف- ۶۵٪ سرامیک ب-۳۵٪ سرامیک ج-۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۷-۶ مقایسه توزیع کرنش پلاستیک محیطی در دماهای مختلف الف- ۶۵٪ سرامیک ب-۳۵٪ سرامیک ج-۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۷-۷ مقایسه توزیع کرنش پلاستیک ضخامت در دماهای مختلف الف- ۶۵٪ سرامیک ب-۳۵٪ سرامیک ج-۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۷-۸ مقایسه توزیع کرنش پلاستیک معادل در دماهای مختلف الف- ۶۵٪ سرامیک ب-۳۵٪ سرامیک ج-۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۷-۹ مقایسه توزیع تنش ماکزیمم در دماهای مختلف، الف-۱۰۰٪ سرامیک ب- ۶۵٪ سرامیک ج-۳۵٪ سرامیک د-۱۰۰ آلومینیوم
شکل ۷-۱۰ مقایسه کرنش‌های حرارتی و کل شعاعی الف- ۱۰۰٪ سرامیک در دماهای ۳۳۰ و ۴۳۰ کلوین ب-۱۰۰٪ سرامیک در دماهای ۶۳۰ و ۸۳۰ کلوین ج- ۱۰۰٪ آلومینیوم در دماهای ۳۳۰ و ۴۳۰ کلوین د- ۱۰۰٪ آلومینیوم در دماهای ۶۳۰ و ۸۳۰ کلوین
شکل ۷-۱۱ مقایسه کرنش‌های حرارتی و کل محیطی الف- ۱۰۰٪ سرامیک در دماهای ۳۳۰ و ۴۳۰ کلوین ب-۱۰۰٪ سرامیک در دماهای ۶۳۰ و ۸۳۰ کلوین ج- ۱۰۰٪ آلومینیوم در دماهای ۳۳۰ و ۴۳۰ کلوین د- ۱۰۰٪ آلومینیوم در دماهای ۶۳۰ و ۸۳۰ کلوین

شکل ۷-۱۲ مقایسه توزیع تنش معادل در دماهای مختلف در راستای شعاعی، الف-۱۰۰٪ سرامیک ب- ۶۵٪ سرامیک ج-۳۵٪ سرامیک د-۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۷-۱۳ مقایسه توزیع تنش شعاعی در دماهای مختلف در راستای شعاعی، الف-۱۰۰٪ سرامیک ب- ۶۵٪ سرامیک ج-۳۵٪ سرامیک د-۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۷-۱۴ مقایسه توزیع تنش محیطی در دماهای مختلف در راستای شعاعی، الف-۱۰۰٪ سرامیک ب- ۶۵٪ سرامیک ج-۳۵٪ سرامیک د-۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۷-۱۵ مقایسه توزیع تنش ضخامت در دماهای مختلف در راستای شعاعی، الف-۱۰۰٪ سرامیک ب- ۶۵٪ سرامیک ج-۳۵٪ سرامیک د-۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۷-۱۶ مقایسه توزیع کرنش پلاستیک شعاعی در دماهای مختلف، الف- ۶۵٪ سرامیک ب- ۳۵٪ سرامیک ج-۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۷-۱۷ مقایسه توزیع کرنش پلاستیک محیطی در دماهای مختلف، الف- ۶۵٪ سرامیک ب- ۳۵٪ سرامیک ج-۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۷-۱۸ مقایسه توزیع کرنش پلاستیک ضخامت در دماهای مختلف، الف- ۶۵٪ سرامیک ب- ۳۵٪ سرامیک ج-۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۷-۱۹ مقایسه توزیع کرنش پلاستیک معادل در دماهای مختلف، الف- ۶۵٪ سرامیک ب- ۳۵٪ سرامیک ج-۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۷-۲۰ مقایسه توزیع تنش ماکزیمم در دماهای مختلف در راستای شعاعی، الف-۱۰۰٪ سرامیک ب- ۶۵٪ سرامیک ج-۳۵٪ سرامیک د-۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۷-۲۱ مقایسه توزیع تنش مینیمم در دماهای مختلف در راستای شعاعی، الف-۱۰۰٪ سرامیک ب- ۶۵٪ سرامیک ج-۳۵٪ سرامیک د-۱۰۰٪ آلومینیوم
شکل ۷-۲۲ مقایسه توزیع کرنش‌های کل و حرارتی شعاعی، الف- تا کسر حجمی ۶۵٪ سرامیک ب- تا کسر حجمی ۱۰۰٪ آلومینیم
شکل ۷-۲۳ مقایسه توزیع کرنش‌های کل و حرارتی محیطی، الف- تا کسر حجمی ۶۵٪ سرامیک ب- تا کسر حجمی ۱۰۰٪ آلومینیم

فهرست جداول

جدول ۵-۱ خواص آزمایشگاهی وابسته به دما اجزاء تشکیل دهنده FGM