دانشکده مهندسی
گروه مکانیک

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک
گرایش طراحی کاربردی

عنوان:

تحلیل استاتیکی ورق‌های با جنس *FGM*

استاد راهنما:
دکتر اکبر علی‌بیگلو

استاد مشاور:
دکتر محمود شاکری

پژوهشگر:
سید حامد حسینی

مهر 1388

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به

پدر، مادر خانواده عزیزم

برای تمام زحمت‌ها و خوبی‌هایشان

تشکر و قدردانی:

سپاس و حمد مخصوص خدایی است که در تمامی لحظات زندگی، الطاف خود را نصیب حال بندگان خویش می‌نماید. خدایی که آثار وجودش را در هر لحظه از زندگی می‌توان یافت. بی‌تردید انجام هر کاری در گرو خواست اوست و بدون آن هیچ کاری به انجام نخواهد رسید.

بعد از سپاس و حمد پروردگار، لازم می‌بینم از زحمات **پدر** و **مادر** و خانواده خود تشکر نمایم. کسانی که برای رشد و ترقی من از هیچ تلاشی کوتاهی ننموده‌اند. بدون شک به خاطر تمامی موفقیت‌های زندگی، خویش را مدیون آنها می‌دانم و در این فرصت از آنها تشکر می‌کنم.

هر کس در راه زندگی رو به رشد خود نیازمند راهنمایی است تا در فراز و نشیب این راه دستگیر او باشد. اینجانب نیز در راه زندگی علمی خود، وجود استاد ارجمند **دکتر اکبر علی‌بیگلو** را مایهٔ افتخار خود می‌دانم. راهنمایی‌های بی‌منت ایشان در طول این مدت مورد ستایش بوده و از این رو، واژهٔ تشکر کلمه‌ای ناتوان در سپاس از ایشان است.

از اساتید محترم جناب آقای **دکتر محمد حسین یاس** دانشیار گروه مکانیک دانشگاه رازی و جناب آقای **دکتر فرامرز فرشته صنیعی** دانشیار گروه مکانیک دانشگاه بوعلی سینا که با وجود مشغله کاری فراوان، داوری این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

مسلماً پایان‌نامهٔ انجام شده خالی از عیب نمی‌باشد، لذا پیشاپیش از کاستی‌هایی که ممکن است وجود داشته باشد پوزش می‌طلبم و امیدوارم این تحقیق توانسته باشد گوشه‌ای ناچیز از ابهامات دانش بشری را برطرف نماید.

سید حامد حسینی

پاییز 1388

نام و نام خانوادگی: سید حامد حسینی

عنوان پایان نامه:

" تحلیل استاتیکی ورق های با جنس FGM "

استاد راهنما: دکتر اکبر علی‌بیگلو

استاد مشاور: دکتر محمود شاکری

درجه: کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

زمینه مطالعه: تئوری ورق و پوسته

دانشکده: فنی مهندسی- دانشگاه بوعلی سینا

تاریخ فارغ التحصیلی: مهر 1388

واژه‌های کلیدی: تحلیل استاتیکی- ورق مستطیلی- الاستیسیته سه بعدی- روش مربعات تفاضلی- FGM

چکیده:

در این پایان‌نامه، هدف آن است که ورق مستطیلی از جنس FGM با شرایط تکیه‌گاهی مختلف از لحاظ استاتیکی مورد تحلیل قرار گیرد. در استخراج معادلات حاکم از تئوری الاستیسیته سه بعدی استفاده شده است به این ترتیب که از ترکیب معادلات تنش- جابجایی و معادلات تعادل، معادلات فضا- حالت به دست آمده‌اند. از آنجا که در به دست آوردن این روابط هیچ‌گونه تقریبی اعمال نشده، لذا معادلات مذکور کاملاً تحلیلی می‌باشند. در زمینه حل معادلات مربوط از آنجایی که حل تحلیلی سه‌بعدی فقط برای شرایط تکیه‌گاهی ساده امکان‌پذیر است، لذا برای بررسی انواع شرایط مرزی از روش عددی مربعات تفاضلی استفاده شده است. در ادامه تأثیر شرایط تکیه-گاهی بر رفتار ورق تحت بارگذاری، تأثیر تغییر نسبت ضریب الاستیسیته در سطوح بالا و پائین ورق و همچنین تأثیر شرایط هندسی بر رفتار ورق بررسی شده است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه 1

1-1) مقدمه 2

2-1) مروری بر کارهای گذشته 3

فصل دوم: مواد FGM 6

1-2) مقدمه 7

2-2) تاریخچه مواد FGM 7

3-2) ترکیبات مواد FGM 9

1-3-2) مزیت مواد FGM نسبت به کامپوزیت‌ها 11

2-3-2) فرآیندهای تولید مواد FGM 12

3-3-2) روش‌های تولید مواد FGM 13

1-3-3-2) متالورژی پودر 13

2-3-3-2) فرآیند پاشش پلاسما 17

3-3-3-2) فرآیند ته نشاندن افشانکی حرارتی 18

4-3-3-2) فرآیند روکش دادن لیزری 18

5-3-3-2) فرآیندهای ذوبی 19

4-3-2) کاربردهای مواد FGM 23

4-2) مدل‌سازی تغییر خواص در مواد FGM 27

1-4-2) مدل توانی 27

2-4-2) مدل سیگموئید 28
3-4-2) مدل نمایی 30
فصل سوم: روش عددی GDQ 33
1-3) مقدمه 34
2-3) روش GDQ 35
3-3) تعیین مختصات گره‌ها 36
4-3) تعیین ضرایب وزنی 37
فصل چهارم: حل تحلیلی برای تکیه‌گاه ساده 42
1-4) مقدمه 43
2-4) بی‌بعد سازی 45
3-4) پاسخ هارمونیک 46
4-4) معادلات فضا- حالت 48
5-4) حل معادلات 49
1-5-4) معادلات کاربردی 49
2-5-4) اعمال شرایط سطحی 50
فصل پنجم: حل عددی به روشGDQ برای تکیه‌گاه‌های مختلف 52
1-5) مقدمه 53
2-5) حل عددی به روش GDQ در یک راستا 53
1-2-5) ورق دو سر ساده 54
2-2-5) ورق دو سر گیردار 57
3-2-5) ورق گیردار- ساده 59

4-2-5) ورق گیردار- آزاد 61

3-5) حل عددی به روشGDQ در دو راستا 64

4-5) حل معادلات 69

فصل ششم: نتایج عددی و بحث در آن 72

1-6) مقدمه 73

2-6) جنبه‌های نوین تحقیق 73

3-6) مقایسه و بررسی نتایج 73

1-3-6) خصوصیات ورق مورد بررسی 74

2-3-6) مقایسه نتایج حل تحلیلی با نتایج به دست آمده از مقالات 74

3-3-6) مقایسه نتایج حل عددی با نتایج تحلیلی برای تکیه‌گاه ساده 74

4-6) بررسی تأثیر شرایط تکیه‌گاهی در رفتار ورق 78

5-6) بررسی تأثیر تغییر نسبت ضریب الاستیسیته در سطوح بالا و پایین ورق 84

1-5-6) بررسی تأثیر تغییرات $\frac{E_h}{E_0}$ در حالت CC 84

2-5-6) بررسی تأثیر معکوس نمودن نسبت $\frac{E_h}{E_0}$ در حالت CS 86

6-6) بررسی تأثیر شرایط هندسی در رفتار ورق 89

7-6) مقایسه نتایج اعمال روش GDQ در دو راستا با نتایج حل تحلیلی برای تکیه‌گاه ساده 91

8-6) نتیجه‌گیری 93

9-6)پیشنهادها 95

منابع

منابع و مآخذ 96

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل (2-1): مقایسه مواد FGM با مواد کامپوزیت 11

شکل (2-2): فرآیند پلاسما اسپری 18

شکل (2-3): طرح دستگاه ریخته‌گری گریز از مرکز 20

شکل (2-4): گرادیان تولید شده از چگالی ذرات در طول یک ماده FGM تولید شده با روش ریخته‌گری رسوبی 20

شکل (2-5): قالب ریزی کنترل شده 21

شکل (2-6): روش انجماد جهت دار (a) همرفت طبیعی، (b) همرفت اجباری 22

شکل (2-7): نفوذ الکتروشیمیایی 23

شکل (2-8): مولد توان ترمو الکتریکی 25

شکل (2-9): نمای شماتیک یک ورق FGM 27

شکل (2-10): تغییرات ضریب یانگ در یک ماده P-FGM 28

شکل (2-11): تغییرات ضریب یانگ در یک ماده P-FGM 29

شکل(2-12): تغییرات ضریب یانگ در یک ماده E-FGM 30

شکل(3-1): شبکه بندی با فواصل نامساوی 37

شکل (4-1): مدل شماتیک از ورق FGM 43

شکل (6-1): بررسی همگرایی و مقایسهٔ نتایج حل تحلیلی و عددی برای جابجایی طولی در امتداد ضخامت 75

شکل (6-2): بررسی همگرایی و مقایسهٔ نتایج حل تحلیلی و عددی برای جابجایی در راستای ضخامت 75

شکل (6-3): بررسی همگرایی و مقایسهٔ نتایج حل تحلیلی و عددی برای تنش برشی عرضی در امتداد ضخامت 76

شکل (6-4): بررسی همگرایی و مقایسهٔ نتایج حل تحلیلی و عددی برای تنش قائم طولی در امتداد ضخامت 76
شکل (6-5): بررسی همگرایی و مقایسهٔ نتایج حل تحلیلی و عددی برای تنش برشی صفحه‌ای در امتداد ضخامت 77
شکل (6-6): بررسی همگرایی و مقایسهٔ نتایج حل تحلیلی و عددی برای تنش قائم عرضی در امتداد ضخامت 77
شکل (6-7): بررسی تأثیر نوع تکیه‌گاه بر جابجایی ورق در راستای ضخامت در امتداد طولی 78
شکل (6-8): بررسی تأثیر نوع تکیه‌گاه بر تنش قائم طولی در امتداد طول ورق 79
شکل (6-9): بررسی تأثیر نوع تکیه‌گاه بر تنش برشی عرضی در امتداد طولی 80
شکل (6-10): تنش قائم طولی و تنش برشی عرضی برای تکیه‌گاه گیردار 81
شکل (6-11): تنش قائم طولی و تنش برشی عرضی برای تکیه‌گاه ساده 81
شکل (6-12): بررسی تأثیر نوع تکیه‌گاه بر جابجایی طولی ورق در امتداد طول آن 82
شکل (6-13): جابجایی طولی در ضخامت‌های مختلف 83
شکل (6-14): تنش برشی عرضی در امتداد طولی در ضخامت‌های مختلف 83
شکل (6-15): تأثیر تغییرات نسبت ضریب الاستیسیته بر جابجایی ورق در امتداد ضخامت 84
شکل (6-16): تأثیر تغییرات نسبت ضریب الاستیسیته بر تنش برشی عرضی در امتداد ضخامت 85
شکل (6-17): تأثیر تغییرات نسبت ضریب الاستیسیته بر تنش قائم عرضی در امتداد ضخامت 86
شکل (6-18): تأثیر معکوس نمودن نسبت ضریب الاستیسیته بر جابجایی ورق در راستای ضخامت 87
شکل (6-19): تأثیر معکوس نمودن نسبت ضریب الاستیسیته بر تنش برشی عرضی در امتداد ضخامت 87
شکل (6-20): تأثیر معکوس نمودن نسبت ضریب الاستیسیته بر تنش قائم عرضی در امتداد ضخامت 88
شکل (6-21): تأثیر تغییر نسبت طول به ضخامت بر جابجایی در راستای ضخامت 89
شکل (6-22): تأثیر تغییر نسبت طول به ضخامت بر تنش برشی عرضی در امتداد ضخامت 90
شکل (6-23): تأثیر تغییر نسبت طول به ضخامت بر تنش برشی صفحه‌ای در امتداد ضخامت 90
شکل (6-24): مقایسهٔ نتایج حل تحلیلی و عددی برای جابجایی طولی در امتداد ضخامت 91
شکل (6-25): مقایسهٔ نتایج حل تحلیلی و عددی برای تنش قائم عرضی در امتداد ضخامت 92

شکل (6-26): مقایسهٔ نتایج حل تحلیلی و عددی برای تنش برشی عرضی در امتداد ضخامت 92
شکل (6-27): مقایسهٔ نتایج حل تحلیلی و عددی برای تنش قائم طولی در امتداد ضخامت 93

فصل اول

مقدمه

1-1) مقدمه

بشر همواره در تلاش برای یافتن موادی بوده که دارای بهترین عملکرد در شرایط مختلف کاری باشند. پس از شناخته شدن تمام مواد خالص و قابلیت‌های آن‌ها و عدم تـأمین نیازهـای بشـری توسـط ایـن مواد، نیاز به مواد جدیدی که نیازهای موجود را برطرف سازد به شدت احساس می‌شـد. بـدین ترتیـب فکر ساختن موادی که دارای خواص کامل‌تری باشند بشر را به سمت ترکیب مواد خـالص مختلـف بـا یکدیگر و ساختن مواد مرکب هدایت نمود. بدین صورت مواد مرکب به بازار عرضـه شـدند. بـا ترکیـب مناسب مواد خالص، مواد مرکبی تولید شدند که دارای ویژگی‌های بسیار خوبی بودنـد ولـی جوابگـوی تمام نیازهای بشر نبودند. مواد مرکب، یکنواختی لازمی را که مواد خالص داشتند برآورده نمی‌کردنـد و در نتیجه فکر ساختن نوعی از مواد مرکـب کـه یکنواخـت باشـند بشـر را بـه سـمت سـاخت و تولیـد مواد FGM[1] هدایت نمود. چنانچه می‌دانید در عرصه تحقیقات صنعتی و پیشرفت‌های نوین تکنولـوژی در راستای بالا بردن راندمان سازه‌ها و قطعات پیشرفته، در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای بـه اسـتفاده از مواد نو شده است، به طوری که شناخت و فناوری تولید و گسترش استفاده از این گونه مـواد هـر روزه توسط دانشمندان و محققین دامنه بیشتری می‌یابد. هـر دسـته از ایـن مـواد دارای خاصـیت ویـژه‌ای هستند که برای استفاده در حوزه خاصی از صنعت به کار گرفته می‌شوند. گسترش دامنه به کـارگیری این نوع مواد باعث پیشرفت‌های وسیعی در پژوهش‌های علمـی و صـنعتی در تحلیـل خـواص مـواد و استفاده از آن‌ها در اجزا و قطعات مکانیکی گردیده است. در بسیاری از قطعات صنعتی نظیر موتورهای احتراق داخلی، مخازن تحت فشار در نیروگاه‌های اتمی و سازه‌های هوایی- فضایی، درجه حـرارت‌هـای بسیار بالا، باعث ایجاد تنش‌های حرارتی می‌گردد. این تنش‌ها و تنش‌های مکـانیکی ناشـی از بارهـای خارجی، باعث بروز اثرات مخربی نظیر ترک، شکست، خستگی و کمانش در قطعات می‌شـوند و عـلاوه بر این موارد مشکلات دیگری مانند ترد شدن برخی از مواد در میـدان‌هـای حرارتـی بـا گرادیـان‌هـای بالای درجه حرارت نیز به علت عدم قابلیت تحمل درجه حرارت‌های بالا بوجود می‌آید. برای رفـع ایـن

[1]- Functionally graded materials

مشکل نیاز به موادی که دارای قابلیت‌های بالای مقاومت حرارتی، مکانیکی و خوردگی باشند تا امکان تحمل تنش‌های حرارتی و مکانیکی در آن‌ها افزایش یابد، احساس شد. بدین ترتیب دسته‌ای از مواد توسط محققین ساخته شد که غیر همگن و ایزوتروپ بوده و خواص آن‌ها از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کند. مقاومت مکانیکی، مقاومت به سایش، سختی، ضریب الاستیسیته، چگالی و ضریب انتقال حرارت هدایتی در این گونه مواد تابعی پیوسته است که بدین ترتیب مشکلات ناشی از تغییرات ناگهانی در سطح تماس دو ماده را برطرف می‌کند.

2-1) مروری بر کارهای گذشته

در این پایان‌نامه، هدف آن است که ورق FGM با شرایط تکیه‌گاهی مختلف از لحاظ استاتیکی مورد تحلیل قرار گیرد. در استخراج معادلات حاکم از تئوری الاستیسیته سه بعدی استفاده شده است. به این ترتیب که از ترکیب معادلات تنش- جابجایی و معادلات تعادل، معادلات فضا- حالت[1] به دست آمده‌اند. در زمینه حل معادلات مربوطه از آنجایی که حل تحلیلی سه بعدی فقط برای شرایط تکیه-گاهی ساده امکان‌پذیر است، لذا برای بررسی انواع شرایط مرزی از روش عددی GDQ[2] استفاده شده که توضیحات مربوط به این روش در فصل سوم ارائه شده است. در ادامه به برخی از کارهای صورت گرفته در این راستا پرداخته می‌شود.

Praveen و Reddy در سال 1998 پاسخ غیر خطی استاتیکی و دینامیکی ورق های FGM را با استفاده از تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول بررسی نمودند[1].

در سال 1999، Liu و Liew ارتعاشات آزاد ورق‌های قطاعی را بر پایه تئوری تغییرشکل برشی مرتبه اول میندلین[3] و با استفاده از روش DQ[4] بررسی نمودند[2].

[1]- State-Space
[2]- Generalized differential quadrature
[3]- Mindlin first order shear deformation theory
[4]- Differential quadrature

Reddy در سال 2000 حل ناویر برای ورق های FGM بر پایه تئوری تغییرشکل برشی مرتبه سوم[1] (TSDT) و مدل اجزاء محدود مربوط به آن را ارائه نمود[3] .

Cheng و Batra در سال 2000 از تئوری تغییرشکل برشی مرتبه سوم Reddy برای مطالعه کمانش و ارتعاشات حالت پایدار یک ورق FGM چند ضلعی با تکیه گاههای ساده استفاده نمودند[4].

در سال 2001، Liew به منظور حل استاتیکی سه‌بعدی ورق مستطیلی از روش DQ استفاده نمود[5].

در سال 2004، Kitipornchai و همکارانش، از ترکیب روش DQ و روش گلرکین[2] برای به دست آوردن فرکانس‌های ارتعاشی ورق‌های FGM مستطیلی تحت شرایط مرزی مختلف استفاده نمودند[6].

در سال 2004، Kashtalyan حل الاستیسیته سه بعدی برای ورق FGM با تکیه‌گاه‌های ساده و تحت تأثیر نیروی هارمونیک برشی را ارائه داد [7].

در سال 2004، Chen و همکارانش، از ترکیب روش فضا- حالت و روش DQ برای بررسی خمش و ارتعاشات آزاد تیر قرار گرفته روی تکیه‌گاه پسترناک[3] استفاده نمودند[8].

Civalek کمانش ورق ایزوتروپ نازک را در سال 2004 به روش DQ مورد بررسی قرار داد[9].

در سال 2005، Elishakoff و همکارانش ورق FGM با تکیه‌گاه‌های گیردار را از نظر استاتیکی بررسی نمودند که از روش انرژی Ritz در به دست آوردن و حل معادلات استفاده نمودند[10].

در سال 2005، Chen ارتعاشات سه بعدی ورق کامپوزیتی با لایه‌های عمود بر هم را با استفاده از ترکیب روش فضا- حالت و روش DQ مورد بررسی قرار داد[11].

مدلی که بر پایه تئوری کلاسیک لاو –کیرشهف استوار بود توسط Chi و Chung در سال 2006 برای ورق های FGM به‌کار رفت. آن‌ها حل تحلیلی ورق های FGM با تکیه گاه ساده قرار گرفته در معرض بارهای مکانیکی را ارائه نمودند[12].

در سال 2007، Nie و همکارش ارتعاشات آزاد و اجباری ورق‌های FGM دایروی تحت شرایط مرزی مختلف را با استفاده از ترکیب روش فضا- حالت و روش DQ بررسی نمودند[13].

---

[1]- Third order shear deformation theory
[2]- Galerkin method
[3]- Pasternak foundation

در سال Chang 2007 ورق FGM تحت پیچش و خمش را بررسی نمود که معادلات لازم را از این روش به دست آورد[14].

در سال 2008، Lu و همکارانش از ترکیب روش فضا- حالت و روش DQ برای تحلیل خمش و تغییر شکل‌های حرارتی تیرهای FGM استفاده نمودند[15].

در سال 2008،Chen و Lu ارتعاشات آزاد و خمش ورق‌های کامپوزیتی چندلایه را با اعمال روش DQ در دو راستا و استفاده از روش فضا- حالت بررسی نمودند[16].

Huang و همکارانش در سال 2008، ورق ضخیم FGM روی بستر الاستیک را مورد بررسی قرار دادند که از روش فضا- حالت در به دست آوردن معادلات استفاده کردند[17].

Xu و Zhou در سال 2009، ورق FGM با ضخامت متغیر را از لحاظ استاتیکی مورد مطالعه قرار دادند که در این مطالعه از معادلات تعادل بر حسب جابجایی‌ها استفاده نمودند[18].

همچنین در سال 2009 علی‌بیگلو، ورق کامپوزیت با لایه‌های پیزوالکتریک را از لحاظ استاتیکی بررسی نمود که در حل معادلات مربوطه از روش DQ استفاده کرده است[19].

همچنین در سال 2009 علی‌بیگلو، یک پنل کامپوزیتی را از لحاظ استاتیکی تحلیل نمود که در آن، معادلات مربوطه از روش فضا- حالت به دست آمده‌اند[20].

فصل دوم

مواد FGM

2-1) مقدمه

طبق تعریف، مواد FGM موادی هستند که برای به وجود آوردن تغییرات تدریجی در مشخصه-های اجزا، ریز ساختارها یا ترکیبات به کار می روند که منجر به عملکرد متغیر مواد نسبت به مکان می‌شوند. کنترل و کمینه کردن تنش‌های حرارتی در نواحی بحرانی، تأخیر در نقطه تسلیم، پلاستیک و شکست برای بارگذاری‌های حرارتی- مکانیکی، جلوگیری از ایجاد تمرکز تنش و کاهش مشکلات ناشی از بارگذاری‌های مکانیکی نظیر انواع ترک و تغییر شکل از جمله مواردی هستند که به وسیله تولید و استفاده از این مواد بهبود می‌یابند.

2-2) تاریخچه مواد FGM

نخستین جرقه‌های تولید این مواد در صنایع هوا- فضا بود. نیاز به ساخت موادی که بتوانند تنش‌های شدید حرارتی را تحمل کنند، انگیزه اولیه ساخت مواد FGM را در ذهن محققان ایجاد کرد[21]. به عنوان مثال روی سطح شاتل‌های فضایی، معمولاً دما هنگام ورود به جو به 2100 کلوین می‌رسد و این سطوح می‌بایست اختلاف دمایی در حدود 1600 کلوین را تحمل نمایند. دانشمندان علم مواد در ژاپن در مرکز تحقیقات هوا- فضا در شهر سندایی اولین پیشگامان طراحی و ساخت چنین موادی بودند. البته ایده ترکیب مواد و ایجاد چنین ساختاری به سال 1972 و دو دانشمند به نام‌های Bever و Duwez بر می‌گردد. آن‌ها ایده ترکیب دو فاز مختلف را با تغییر در نحوه آرایش و ترتیب هر کدام از فازها در هر لایه در جهت بهبود خواص مکانیکی مطرح کردند. ایده آن‌ها عموماً مربوط به ضعف مواد مرکب در بسیاری از کاربردها بود که Gotzel در دهه‌های 1950و1960 با تحقیقات گسترده‌ای که روی کامپوزیت‌ها انجام داده بود، آنها را نشان داد. اما مواد FGM چنان چه گفته شد اولین بار در سال 1984 میلادی در ژاپن ساخته شد و پس از آن عصر جدیدی برای تحقیقات گسترده روی این نوع مواد گشوده گشت. در آن سال در ژاپن یک گروه دولتی پیش بینی

کردند که درگیری شدید ژاپن در تحقیقات فضایی و رشد روز افزون این تحقیقات نشان دهنده وابستگی شدید صنعت این کشور به تولید چنین موادی می‌باشد. به این ترتیب دانشمندان ژاپنی تحقیقات خود را روی پروژه هواپیمای فضایی آغاز کردند. پژوهش‌ها نشان داد که اجزای سازه‌های به کار رفته در هواپیمای فضایی تحت بارهای بسیار شدید قرار می‌گیرند و بنابراین در ترکیب و درجه-بندی ریز ساختارهای سازه‌های بدنه باید به دو مورد توجه شود. اولاً اجزای سازه از مواد موجود و در دسترس تولید شوند و ثانیاً به نحوی از تنش‌های ایجاد شده در اثر ناپیوستگی‌های مواد که عموماً در مواد مرکب چند لایه ایجاد می‌شود جلوگیری شود. نتایج این تحقیقات موجب تشکیل سازمانی از دانشمندان علوم مختلف در سال1987 (سه سال بعد از طرح اولین ایده ساخت FGM) در کشور ژاپن شد. هدف این سازمان که بودجه تحقیقاتی بسیار زیادی به آن اختصاص داده شده بود، انجام تحقیقات گسترده در ارتباط با مواد FGM و نهایتاً ساخت آن‌ها بود. این سازمان تحقیقات خود را روی سازه‌هایی که یک وجه آن‌ها سرد و وجه دیگرشان در محیط بسیار داغ نگهداری می‌شدند معطوف نمود. پس از انجام پژوهش‌های فراوان، فلز و سرامیک به عنوان مواد تشکیل دهنده FGM انتخاب شدند. ادامه این تحقیقات تا سال 1991 ادامه یافت و آزمایش‌هایی برای انتخاب درصد مناسب مخلوط انجام شد. در پایان آن سال نیز چند قطعه آزمایشگاهی از جمله یک ورق مربعی 300 میلیمتر مربعی و یک پوسته نیم کروی با شعاع 50 میلیمتر ساخته شد.

در سال 1993 میلادی دومین پروژه تحقیقاتی در زمینه مواد FGM با هدف استفاده از این مواد برای بهینه کردن تبدیل انرژی حرارتی به الکتریکی که در مواد ترموالکتریک و ترمویونیک به کار می-روند آغاز شد که در این برنامه عمده توجه دانشمندان ژاپنی بر روی سیستم‌های انرژی بود. در پروژه دوم، مواد FGM در حقیقت برای مینیمم کردن تنش‌های حرارتی سیستم‌ها مورد استفاده قرار می-گرفتند. دستیابی به راندمان بالاتر در محدوده وسیعتری از تغییرات درجه حرارت، به عنوان مرحله بعد از تحقیقات بر روی خواص مواد FGM بود.

درفاصله سال های 1980 تا 1990 در خارج از کشور ژاپن نیز چگونگی ساخت و استفاده از مواد FGM محور تحقیقاتی مهمی شده بود[22] به طوری که برخی از این کشورها مانند آلمان، ایالات متحده، روسیه و چین تا امروز هم برای دستیابی به این فناوری تلاش بسیار می‌کنند. به عنوان نمونه ای از این تلاش‌ها می‌توان به پروژه عظیم شش ساله‌ای که با همکاری آزمایشگاه‌های تحقیقاتی-صنعتی زیادی در کشور آلمان طراحی و انجام شد اشاره کرد که شامل چهار فاز اصلی بود:

- فرآیند تولید مواد FGM بر اساس ذوب کردن شامل سه بخش عمده:

1- ریخته‌گری

2- صاف کردن

3- رشد کریستالی

- فرآیند تولید مواد FGM بر اساس پودر کردن

- مدل‌سازی ترمو مکانیکی

- ساخت موادی برای کاربرد در علوم پزشکی (زیست پزشکی)

2-3) ترکیبات FGM

ترکیبات مختلفی برای تغییرات تدریجی در مواد FGM پیشنهاد شده است و هر کدام هم دارای محاسن و معایب مخصوص به خود هستند. در این ترکیب‌ها خواص FGM از خواص یک ترکیب یا ماده به سمت خواص ماده یا ترکیب دیگر به تدریج تغییر می‌کند. معمولاً نوع ترکیبی که برای این نوع از مواد در نظر گرفته می‌شود به صورتی است که خواص مواد ترکیبی به نوعی مکمل یکدیگر باشند و هر کدام کمبودهای دیگری را جبران نمایند. یکی از معروف‌ترین ترکیب‌های موجود در ساخت FGM مربوط به ترکیب فلز و سرامیک می‌باشد. در این ترکیب، خواص مواد از خواص