دانشکده مهندسی

گروه مکانیک

ارائه شده جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

عنوان

بررسی پدیده خستگی در اتصالات دکل حفاری

نگارنده

ایمان آرامش

استاد راهنما

دکتر خسرو نادران طحان

استاد مشاور

دکتر محمد شیشه‌ساز

شهریور ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحیم

بسمه تعالی

دانشگاه شهید چمران اهواز

مدیریت تحصیلات تکمیلی

(نتیجه ارزشیابی پایان نامه دوره کارشناسی ارشد/دکتری)

بدین وسیله گواهی می‌گردد پایان‌نامه آقای **ایمان آرامش** دانشجوی رشته **مکانیک (طراحی کاربردی)** از دانشکده **مهندسی** به شماره دانشجویی **۸۶۴۰۱۰۶** تحت عنوان: **بررسی پدیدهٔ خستگی در اتصالات دکل حفاری** جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در تاریخ۱۳۸۹/۶/۲۸ توسط هیئت داوران مورد ارزشیابی قرار گرفت و با درجه تصویب گردید.

۱- اعضا هیئت داوران: مرتبه علمی امضا

الف - استاد راهنما:
ب - استاد مشاور:
ج – داور۱:
د – داور ۲:
هـ – نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه (استاد ناظر):

۲- مدیر گروه:

۳- معاون پژوهشی دانشکده:

۴- مدیر کل تحصیلات تکمیلی:

این تلاش را به پدر، مادر و تمامی آموزگارانم

تقدیم می‌کنم

از جناب آقای دکترخسرو نادران طحان کمال تشکر را دارم که با راهنماییهای مناسب

این پروژه را در رسیدن به اهداف خود یاری کردند. از جناب آقای دکتر محمد شیشه‌ساز

نیز به علت صرف زمان در جهت مشاورۀ این پروژه، سپاسگذارم

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فرم ارزشیابی ..... **أ**

اهدانامه ..... **ب**

تقدیر و تشکر ..... **ت**

فهرست مطالب ..... **ث**

فهرست شکل‌ها ..... **خ**

فهرست جدول‌ها ..... **ث**

فهرست علامت‌ها ..... **ث**

چکیده پایان نامه ..... **ث**

فصل اول

مقدمه **۱**

۱.۱ معرفی اتصالات ۲

۲.۱ هدف از انجام این پایان نامه ۳

فصل دوم

پژوهش‌های پیشین **۴**

فصل سوم

پیشینه تئوری **۱۱**

۱.۳ تنش‌های تماسی ۱۱

۱.۱.۳ تماس استوانه‌ای ۱۱

۲.۳ خستگی ناشی از تنش‌های سطح ۱۲

۳.۳ خستگی ناشی از تنش‌های داخلی ۱۳

۴.۳ جازنی‌ها و درصد تداخل ۱۴

فصل چهارم

روش پژوهش ۱۶

۱.۴ تشریح روش حل و نرم افزار ۱۶
۲.۴ تشریح مدل گوشواره ۱۶
۱.۲.۴ تشریح هندسی مدل ۱۷
۲.۲.۴ انتخاب المان و نوع ماده ۱۷
۳.۲.۴ شرایط مرزی مسئله ۱۸
۴.۲.۴ شرایط نیرو در مسئله ۱۹
۵.۲.۴ نوع تحلیل‌ها ۱۹
۶.۲.۴ معیار همگرایی ۲۰
۳.۴ تشریح مدل صفحه‌ای گوشواره ۲۰
۱.۳.۴ تشریح مدل ۲۰
۲.۳.۴ انتخاب المان و نوع ماده ۲۱
۴.۳.۳ نوع نیرو، درجات آزادی و تحلیل‌ها ۲۱
۴.۴ اتصالات چند حفره‌ای ۲۲
۱.۴.۴ انجام تحلیل صفحه‌ای اتصال چند حفره‌ای ۲۲
۲.۴.۴ اتصال دو حفره‌ای در دکل ۲۳

فصل پنجم

نتایج، بحث وبررسی ۲۴

۱.۵ تعداد المان‌های مناسب ۲۴
۲.۵ اتصال گوشواره‌ای ۲۶
۱.۲.۵ ارائهٔ مدل‌های اولیه ۲۶
۲.۲.۵ بهبود مدل‌های گوشواره‌ای ۳۰
۳.۲.۵ طبقه بندی مدل‌های گوشواره‌ای ۳۲
۳.۵ بهبود به‌کمک جازنی‌ها ۳۴
۱.۳.۵ شرایط بحرانی در مدل‌ها ۳۴
۲.۳.۵ جازنی در مدل‌ها ۳۸
۴.۵ خستگی اتصال گوشواره‌ای ۴۰
۱.۴.۵ بررسی خستگی سطح ۴۰
۲.۴.۵ بررسی خستگی تنش‌های داخلی ۴۱

۵.۵ اتصالات چند حفره‌ای ۴۲
۱.۵.۵ مدل صفحه‌ای ۴۲
۲.۵.۵ اتصال مورد کاربرد در دکل ۴۳

فصل ششم

نتیجه‌گیری ۴۴

مراجع ۴۶

فهرست شکل‌ها

شکل۳-۱: تماس خارجی دو استوانه ۱۱
شکل۴-۱: گوشوارهٔ مورد کاربرد در دکل ۱۶
شکل۴-۲: اندازهٔ گوشواره در نرم افزار ۱۷
شکل۴-۳: اجزاء شکل ۴-۲ ..... ۱۷
شکل۴-۴: شکل المان Solid۹۲ ..... ۱۸
شکل۴-۵: تشریح مدل گوشواره ۱۹
شکل۴-۶: تشریح مدل صفحه‌ای گوشواره ۲۱
شکل۴-۷: تشریح مدل صفحه‌ای چند حفره‌ای ۲۲
شکل۴-۸: تشریح مدل مورد کاربرد در دکل ۲۳
شکل۵-۱: شکل تیر ساده ۲۴
شکل۵-۲: تغییرات معیار همگرایی بر اساس تعداد المان‌ها در تیر ۲۵
شکل۵-۳: مدل‌های ابتدایی و مورد کاربرد ۲۶
شکل۵-۴: جزء پایین مدل یک‌سکو ۲۶
شکل۵-۵: نتایج مدل۵-۳-الف (بدون تماس) ۲۷
شکل۵-۶: نتایج مدل ۵-۳-الف (تماسدار) ۲۷
شکل۵-۷: مکان بیشینهٔ تنش معادل در مدل دکل، تحت نیروی کلی ۲۹
شکل۵-۸: نمونه‌های پیشنهادی ۳۰
شکل۵-۹: مکان بیشینهٔ تنش فون‌مایسز در نمونه‌های پیشنهادی ۳۱
شکل۵-۱۰: مدل صفحه‌ای گوشواره ۳۴
شکل۵-۱۱: اعمال نیروی روبه بالا و کانتورهای تنش شعاعی ۳۵
شکل۵-۱۲: اعمال نیروی روبه پایین و کانتورهای تنش شعاعی ۳۵
شکل۵-۱۳: مقایسهٔ نمونهٔ بدون جازنی با مدل جازنی‌شده ۳۶
شکل۵-۱۴: مقایسهٔ نمونهٔ بدون جازنی با مدل جازنی‌شده ۳۷
شکل۵-۱۵: تغییرات تنش معادل بر اساس جازنی در نمونهٔ ۵-۸-ب ۳۹

شکل۵-۱۶: تغییرات تنش معادل بر اساس اندازهٔ جازنی در مدل ۵-۸-ج ۳۹
شکل۵-۱۷: تنش معادل در مدل دو حفره‌ای در مقایسه با نمونهٔ تک‌حفره‌ای ۴۳
شکل۵-۱۸: مکان بیشینهٔ تنش در مدل دوحفره‌ای مورد کاربرد ۴۳

فهرست جدول‌ها

جدول۴-۱: خصوصیات مادهٔ مورد نظر در گوشواره ۱۸
جدول۴-۲: اندازهٔ نیروها و گشتاورها در گوشواره ۱۹
جدول۴-۳: نیروها و گشتاورها در اتصال دو حفره‌ای در دکل ۲۳
جدول۵-۱: تعداد المان‌ها و انرژی کرنشی مجموع المان‌ها در تیر ساده ۲۵
. جدول۵-۲: مقایسه‌ای میان مدل‌های ارائه شده با وجود تماس ۳۲

فهرست علامت‌ها

K_a	ضریب تصحیح سطح
K_b	ضریب تصحیح اندازهٔ قطعه
K_c	ضریب تصحیح نیرو
K_d	ضریب تصحیح دما
K_e	ضریب قابلیت اعتماد
K_f	ضریب سایر عوامل
K_1	ضریب بار-تنش باکینگهام
ν	ضریب پواسون
H_B	سختی برینل
S_C	مقاومت سطح
S_e	حد دوام
S_{ult}	مقاومت نهایی
S_y	مقاومت تسلیم
S_y'	حد دوام بهبود یافته
U_i	انرژی کرنشی
A	مساحت سطح
b	نصف عرض سطح تماس
C	ضریب برش
d	قطر اجسام در حال تماس
E	مدول الاستیسیته
F	نیرو
G	مدول برشی
I	ممان اینرسی

L	طول تماس
N	تعداد سیکل
n	ضریب اطمینان
r	شعاع اجسام در حال تماس
V	نیروی برشی
$P_{\max}$	حداکثر فشار
σ_a	دامنهٔ تنش
σ_e	تنش معادل
σ_m	تنش میانگین

چکیده پایان نامه

نام خانوادگی: آرامش	**نام: ایمان**
عنوان پایان نامه: بررسی پدیدهٔ خستگی در اتصالات دکل حفاری	
استاد راهنما: دکتر خسرو نادران طحان	**استاد مشاور: دکتر محمد شیشه‌ساز**
درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد	**رشته: مهندسی مکانیک** **گرایش: طراحی کاربردی**
محل تحصیل(دانشگاه): شهید چمران اهواز	
دانشکده: مهندسی	
تاریخ فارغ التحصیلی:	**تعداد صفحه:۵۳**

کلید واژه ها: گوشواره، خستگی، جازنی، اتصالات چندحفره‌ای

چکیده: دکل حفاری سازه‌ای پراهمیت در صنعت نفت بشمار می‌رود. این سازه شامل اعضاء اصلی و اتصالات است. عملکرد صحیح این سازه در توانایی تحمل نیروهای اعمالی از رشتهٔ حفاری و دیگر اعضا، در شرایط مختلف خلاصه می‌شود. بنابراین اتصالات دکل باید به گونه‌ای طراحی شوند که تنش‌ها در آنان کمتر از مقدار تسلیم باشد. اتصالات به علت شکل ظاهری از با اهمیت‌ترین اعضا به‌شمار می‌روند. نیروهای اعمالی بر دکل ممکن است دچار تغییر شوند که در چنین شرایطی خستگی در دکل و اتصالات رخ می‌دهد. تحلیل تنش پایه واساس خستگی محسوب می‌شود. این پروژه برخی از اتصالات دکل را تحت شرایط بحرانی مورد تحلیل قرار می‌دهد. از انواع این اتصالات می‌توان به نوع گوشواره‌ای و چندحفره‌ای اشاره کرد. نشان داده می‌شود که اتصال گوشواره‌ای مورد کاربرد، تحت نیروی مذکور نمی‌تواند رفتار الاستیک داشته باشد بنابراین این پروژه نمونهٔ جایگزین را پیشنهاد می‌کند. جازنی بر روی اتصالات گوشواره‌ای انجام می‌شود و تاثیر مثبت آن به دنبال کاهش در تنش، معین می‌شود.

فصل اول

مقدمه

صنعت امروز با مشکلات فراوانی دست به گریبان است و طی سال خسارات وارده بر قطعات مورد کاربرد و سازه‌های ساخته شده از این قطعات شاید تا صدها میلیون دلار ارزیابی شود. با پیشرفت علم مکانیک و با گسترهٔ عظیم کاربرد این علم، استفادهٔ به‌موقع از آن، منجر به عدم وقوع رویدادهای ناخوشایند می‌شود. انجام آزمایشات در برخی مفاهیم و مشاهدهٔ انطباق نتایج تئوری و آزمایشگاهی، زمینه جهت اعتماد به این علم را افزایش می‌دهد.

سازه‌های متنوعی در دنیای امروز وجود دارد. از انواع آن می‌توان به پل‌ها و جرثقیل‌ها اشاره کرد و در ابعاد بسیار کوچکتر یک انبردست را می‌توان به عنوان سازه تلقی کرد. هر سازه‌ای ملزم به انجام فعالیتی می‌باشد به عنوان مثال جرثقیل‌ها بار را از مکانی به مکان دیگر جابجا می‌کنند. تمامی سازه‌ها، بدون توجه به بزرگی یا کوچکی آنها، دارای اعضاء اصلی و همچنین اتصالاتی که به‌منظور سرهم‌بندی این اعضا بکار می‌رود، می‌باشند. عملکرد صحیح و انتظار رفته از سازه، مرهون کارکرد درست و دقیق تک‌تک این اعضا است. این اعضا، توسط اتصالات متفاوتی با یکدیگر در تماس هستند. اتصالات، وظیفهٔ انتقال نیرو از یک عضو به عضو یا اعضاء دیگر را بر عهده دارند.

نیروها و گشتاورها در جامدات تولید تنش می‌کنند، این تنش‌ها در حیطهٔ تئوری جهت جلوگیری از شکست عضو با مقاومت نهایی جسم مقایسه می‌شوند. معمولا در صنعت، از جسمی که رفتار آن در محدودهٔ پلاستیک باشد به عنوان عضو از کار افتاده یاد می‌شود. بنابر این شرایط اطمینان ایستایی از مقایسهٔ مقدار تنش در جسم با مقدار تنش تسلیم آن حاصل می‌گردد.

همانگونه که کلمهٔ اطمینان با عنوان ایستایی در پاراگراف پیش همراه شد می‌توان دریافت، توصیف پیش هنگامی صادق است که نیروی وارده از نوع ایستایی باشد. منظور از نیروی ایستایی، شرایطی است که جسم تنها یکبار تجربهٔ تحمل اندازهٔ مشخص نیرو را خواهد داشت. چنین حالتی،

تقریبی پذیرفتنی از شرایطی می‌باشد که بسیاری از اعضاء سازه‌ها و ماشین‌ها در صنعت عملا در آن قرار دارند. حالتی نیز وجود دارد که در آن تنشهای اعمالی تغییر و یا میان مقادیر مختلف نوسان می‌کنند.

خستگی، حاصل بارهای متغیر با زمان است و از خطرناکترین عوامل همراه سازه‌ها محسوب می‌شود. شکستهای ناگهانی ناشی از این پدیده، منجر به ایجاد صدمات مالی و لطمات جانی فراوانی در صنعت می‌شود. شاخص‌ترین ویژگی اینگونه شکستها آن است که تنشها به دفعات تکرار می‌شوند از اینرو این شکست را شکست خستگی می‌نامند. دانش خستگی، اغلب بر اساس نتایج تجربی و آزمایشگاهی می‌باشد که این امر تقریب را در استفاده از این دانش به‌همراه دارد.

اتصالات نیز همانند سایر اعضاء اصلی یک سازه تحت تنش‌های تکرار شونده قرار می‌گیرند. این اجزا به علت شکل ظاهری از جمله نواحی مستعد جهت تمرکز تنش خواهند بود و در نتیجه، نقاط بحرانی در آنها شکل می‌گیرد. بنابراین می‌توان از اتصالات به عنوان ضعیف‌ترین نواحی سازه‌ها نام برد.

۱.۱ معرفی اتصالات

اتصالات متنوعی در صنعت مورد کاربرد است که از دیدگاه‌های متفاوت، می‌توان به گروه‌های مختلف تقسیم بندی شوند. از یک دید به دو گروه، مجزا می‌شوند:

۱. انواعی که قابلیت باز و بسته شدن دارند، مانند پیچ
۲. انواعی که باز و بسته نمی‌شوند، مانند جوش

هر گروه دارای مزایایی نسبت به دیگری می‌باشد. باز و بسته شدن از مزایای گروه اول است. وجود سایش بین اعضاء اتصال، که عاملی مخرب و کاهندهٔ استحکام خستگی است از معایب نوع اول نسبت به نوع دوم به شمار می‌رود. از نگرشی دیگر، اتصالات به چهار گروه مختلف تفکیک می‌شوند. اتصالاتی که از نوع پیچ، پرچ، جوش و پین می‌باشند.

تماس صفحات که کاربرد زیاد آنها بصورت لبه‌به‌لبه[1] و لبه‌رولبه[1] است، نیز به‌کمک این اتصالات انجام می‌شود. تماس صفحات از یک دید به دو گروه متقارن و نامتقارن مجزا می‌شود و از

[1] Butt joint

نگرشی دیگر می‌توان آنها را به دو گروه تک‌حفره‌ای و چندحفره‌ای تفکیک کرد. تقسیم‌بندیهای اشاره شده از آن‌جهت پیشنهاد می‌شود که تفاوت چشمگیری در رفتار میان دو گروه در هر تقسیم‌بندی در مواجهه با بار یکسان یا در مواجهه با روشهای بهبود خستگی وجود دارد.

۲.۱ هدف از انجام این پایان نامه

دکل حفاری از سازه‌های پر اهمیت است که بر اساس شرایط موجود تحت نیروهای با دامنهٔ ثابت و متغیر قرار می‌گیرد. دکل در هر شرایطی باید بتواند رشتهٔ حفاری را از زمین خارج کند. طراحی صحیح، جهت تحمل بحرانی‌ترین شرایط پدیدآمده برای دکل و اتصالات آن از نکات با اهمیت است. در این پروژه با فرض بر اینکه نیروها در شرایط بحرانی (شرایط گیر رشته) مشخص هستند، تحلیل تنش در اتصالات به عنوان نواحی مستعد جهت بروز تمرکز تنش انجام می‌شود. هدف این پروژه، پیشگیری از بروز نقص در برخی اتصالات دکل است.

جهت دستیابی به این هدف، فصل دوم به مرور مقالاتی پیرامون استحکام خستگی اتصالات و روش‌های بهبود استحکام اختصاص می‌یابد. در فصل سوم، تئوری‌های مرتبط با این تحلیل مورد بررسی قرار می‌گیرد. تشریح کامل اتصالات تحت تحلیل در فصل چهارم مرور می‌شود. نتایج، و مقایسهٔ نتایج با تئوری، در فصل پنجم صورت می‌پذیرد. در فصل ششم نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادات در زمینهٔ کاربرد اتصالات و همچنین پیشنهادات در جهت ادامهٔ کار ارائه خواهد شد.

[1] Lap joint

فصل دوم

پژوهش‌های پیشین

در این فصل، ابتدا مقالاتی پیرامون استحکام خستگی اتصالات و مقایسهٔ آنها، سپس مقالاتی که روش‌های بهبود استحکام خستگی در اتصالات را در بر دارند، ارائه می‌شود.

نکتهٔ با اهمیت در تماس صفحات لبه رو لبه، نامتقارن بودن آن است. خمش ثانویه[۱] از شرایط هندسی موجود پدید می‌آید. این خمش، نتیجهٔ خارج مرکز بودن بار محوری در این نوع از اتصال است. شیجو[۲] و همکارانش استحکام اتصالات متقارن و نامتقارن را بررسی و نتایج حاصل از مقایسهٔ این دو مورد را ارائه کردند[۱]. آنها با تعریف ضریب خمش که نسبت میان تنش خمشی و تنش نامی بود تاکید بر اهمیت این تنش‌ها داشتند. همچنین نشان دادند برای اتصالاتی که تار خنثی دارای خارج از مرکزیتی به اندازهٔ ضخامت صفحات درگیر باشد، ضریب خمش تا مقدار ۳ می‌تواند افزایش یابد. شیجو، با بکارگیری روش‌های عددی، انطباق ضرایب خمش ناشی از تحلیل عددی را با حل تحلیلی نشان داد.

زاویهٔ خط جوش در اتصالات لبه‌ای صفحات، از مباحث مورد نظر در بکارگیری جوش جهت این درگیری محسوب می‌شود. مینگ جن[۳] و همکارانش با انجام آزمایش بر روی نمونه‌هایی با زوایای متفاوت از خط جوش، تاثیر بارگذاری دلخواه را بر این اتصالات مد نظر قرار دادند[۲]. آنها با بکارگیری تئوری‌های متفاوت تخمین تنش، عمر اتصالات را بدست آوردند. از نتایج با اهمیت این

---

[۱] Secondary bending

[۲] J Schijve

[۳] Yi- Ming jen

تحقیقات، یکسان بودن نقطهٔ بحرانی پیش‌بینی شده (در پای جوش) بدون توجه به اندازهٔ زاویهٔ خط جوش است.

تحلیل تنش پایه و اساس تحلیل خستگی است از اینرو دانستن تئوری‌های متفاوت تنش در بکارگیری آنها در شرایط متفاوت، امری اساسی است. تاء کیم[۱] و همکارانش ارزیابی عمر جوش‌ها تحت بار ترکیبی عمودی و برشی را مورد بررسی قرار دادند[۳]. با مروری بر تئوری‌ها اینگونه برداشت شد که اگر سهم تنش برشی از تنش عمودی کمتر از ۲۶ درصد باشد می‌توان از تئوری تنش نرمال با دقت مطلوبی استفاده کرد. استفاده از تئوری تنش نرمال هنگامی‌که نسبت میان تنش برشی و نرمال به یک نزدیک شود منجر به تخمین نادرست عمر خستگی جسم می‌شود.

شیجو مباحث بسیاری را در زمینهٔ اتصالات و استحکام آنان مورد بررسی قرار داده است[۴]. از آن جمله، تحقیق پیرامون برتری استفاده از جوش نسبت به پیچ، به‌دنبال کاهش ضریب تمرکز تنش نقطه‌ای است. مقایسهٔ انواع جوش با یکدیگر و طبقه‌بندی آنان ازنقطه‌نظر استحکام در مواجه با نیروی یکسان از دیگر فعالیتهای او می‌باشد. فعالیتها در زمینهٔ گوشواره‌ها که از نوع اتصالات پین می‌باشند عمدتا محدود به تحقیقات شیجو می‌شود. شیجو استحکام خستگی این اتصالات را در برخی آلیاژهای آلومنیوم بررسی کرد. او با انجام آزمایشات، بر سایش، که از جمله موارد بااهمیت در عمر این اتصالات است، تاکید کرد و بر بهبود استحکام خستگی آنان با محدود شدن سایش اشاره داشت. استخراج فرمول جهت تخمین عمر گوشواره‌های ساخته شده از جنس برخی فلزات، از فعالیتهای او در این زمینه محسوب می‌شود.

انجام فرآیندی که منجر به افزایش عمر اتصال گردد به‌منزلهٔ فرآیند بهبود است. برخی فعالیتها در این زمینه، به ایجاد تنش‌کششی یا پیش‌کشش در جسم منجر می‌شوند. این عامل هنگامی‌که جسم تحت نیروهای دوره‌ای قرار گیرد منجر به افزایش تنش میانگین درجسم می‌شود اما دامنهٔ تنش اعمالی را با کاهش مواجه می‌کند. افزایش تنش میانگین در جسم، عاملی مطلوب نیست اما در مواردی، کاهش دامنهٔ تنش بر افزایش میانگین تنش، غالب است و منجر به بهبود استحکام خستگی می‌شود. فعالیتها به‌منظور بهبود استحکام خستگی در اتصالات را می‌توان به سه گروه عمده تقسیم‌بندی کرد. در گروه اول، فعالیتها در زمره شرایط ایجاد تنش می‌گنجند. در گروه

[۱] I. Tae Kim

دوم، فعالیتها بمنظور بهبود استحکام خستگی در زمره موارد کاهش ضریب اصطکاک و یا کاهش سایش قرار دارند. در گروه سوم کاهش ضریب تمرکز تنش مد نظر است.

مینگوئز[1] و همکارانش اعمال پیش‌کشش(سفت کردن پیچ) و تاثیر آن بر استحکام خستگی اتصالات را مورد بررسی قرار دادند[۵]. در فعالیتها علاوه بر تاثیر گشتاور اعمالی بر پیچ‌ها، اثر ضخامت صفحه نیز بر عمر خستگی نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفت. تحقیقات نشان داد که فرآیند سفت‌کردن پیچ قادر است عمر نمونه‌ها را تا۱۰ برابر افزایش دهد. علت این امر را کاهش سایش و توزیع یکنواخت بار اعمالی به حفرهٔ ایجاد شده در صفحات دانستند. چاخرلو و همکارانش نیز تاثیر فرآیند مشابه در اتصالات را مورد بررسی قرار دادند[۷و۶]. آزمایشات، بهبود عمر خستگی صفحات را در شرایطی که تحت دامنهٔ تنش کم قرار دارند(خستگی پر تکرار)، نشان می‌داد. او و همکارانش اثر فرآیند مشابه بر پیچ‌های واقع در صفحات ترک‌دار را نیز مورد بررسی قرار دادند.

روش‌هایی که طی آنها تنش‌های پسماند فشاری در اتصالات بوجود می‌آیند، مطابق زیر هستند:

- روش غلاف شکافدار
- روش محور کروی
- روش عبور توپ‌ها
- چکش‌کاری اتصال
- اعمال نیروی زیاد در پرچ‌کاری
- جازنی‌های بزرگ در پین‌ها

[1] J.M. Minguez