

بہ نام خدا

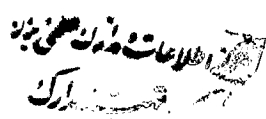
دانشگاه علوم و فنون مازندران

پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد

رشته: مهندسی سیستم های اقتصادی - اجتماعی

عنوان: تحلیل تجربی عوامل موثر بر اندازه تنش های
پسماند جوشی

۱۳۸۸ / ۲ / ۵



استاد راهنما: دکتر اسماعیل ابونوری

استاد مشاور: دکتر ایرج مهدوی

دانشجو: لیلا مهرباب پور

پاییز ۱۳۸۲

۱۱۱۸۵۴

تقدیریم به :

پدر و مادر مهربانم

که تمام موفقیتها و پیشرفتهایم را مدیون زحمات و فداکاریهای آنها هستم
و امید و مشوق من در زندگی و تحصیل می‌باشند.

تحلیل تجربی عوامل موثر بر اندازه تنش های پسماند جوشی

چکیده

خستگی (Fatigue) یک از مهمترین دلایل شکست اجزاء سازه‌هاست. خواص خستگی اکثر مواد بیشتر به شرایط سطحی آنها حساس است تا به شرایط داخلی، چون سطح معمولاً تحت تأثیر بارگذاری‌های ماکزیمم و عوامل محیطی قرار دارد. به همین دلیل، وضعیت سطح در دهه‌های گذشته یکی از مهمترین موضوعات پژوهشی بوده است. وضعیت سطح یک قطعه ساخته شده، بطور کلی با حالات مکانیکی، متالورژیکی، شیمیایی، توپولوژیکی توصیف می‌شود. هر فرآیند تولیدی که سطح جدیدی را ایجاد کند، می‌تواند چنین حالاتی را پدید آورد. یکی از این حالات، تنش‌های پسماند است که در درون قطعه ایجاد می‌شود. این تنش‌ها، تنش‌هایی هستند که در جسم الاستیک وجود خواهند داشت اگر تمام نیروهای خارجی برداشته شوند. بسیار واضح است که فرآیندهای ماشینکاری در سطوح ماشین‌کاری شده تنش‌های پسماند ایجاد می‌کنند. برحسب طبیعت آنها، این تنش‌ها می‌توانند اثرات شدیدی روی عمر قطعات با مکانیزم‌های خستگی، خزش و مقاومت در برابر خوردگی ناشی از تنش بگذارند. بعلاوه، تنش‌های پسماند ناشی از ماشین‌کاری می‌توانند اثرات مخربی روی هندسه قطعه گذاشته، موجب شوند که قطعات به تolerانس‌های مورد نظر نرسند. بنابراین به دلایل صنعتی باید طبیعت تنش‌های پسماند ناشی از ماشین‌کاری را درک کرد و پیش‌بینی نمود و رابطه آنها را با شرایط ماشین‌کاری و رفتار مواد تعیین نمود. بدین منظور از روش کرنش‌سنجی سوراخ که در استاندارد ASTM E 837-95 شرح داده شده است، استفاده می‌شود. این روش برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند سطحی (تا عمق 2mm زیر سطح) در موادی که رفتار الاستیک خطی دارند، مورد استفاده می‌باشد. در حالت‌هایی که تنش پسماند بزرگی وجود دارد، با ایجاد سوراخ در ناحیه مورد نظر به دلیل اثر تمرکز تنش در اطراف سوراخ، تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده، میدان تنش تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در این تحقیق، ابتدا ماهیت تنش‌های پسماند مورد بررسی اجمالی گرفت و سپس با بررسی نمودارهای تغییرات تنش ماکزیمم و مینیمم بر حسب فاصله از سطح ماشین‌کاری شده (عمق)، راجع به نحوه تأثیر پارامترهای انتخاب شده روی تنش‌های پسماند حاصله بحث شد. نتایج حاصله حاکی از آن است که روابط حاصل از برازش مدل می‌تواند جایگزین مناسبی برای برآورد و پیش‌بینی رفتار فلز تحت عملیات بارگذاری باشد. جمع‌آوری اطلاعات بر مبنای نمونه‌های آزمایشگاهی بوده است. پس از بررسی نتایج بدست آمده در آزمایشگاه به منظور حذف مراحل آزمایشگاهی در جهت حفظ شرایط کاربردی نمونه‌های تخریب شده ای که تحت آزمایش قرار می‌گیرند برآوردی توسط نرم افزار Eviwes انجام شد که می‌تواند پاسخگوی این شرایط باشد. در این راستا پرسش و فرضیه زیر مطرح شده است:

پرسش: آیا می‌توان با الگو سازی و برازش نتایج حاصل از آزمایشگاه انجام مراحل آزمایشگاهی را حذف نمود و در نتیجه باعث افزایش سرعت در تصمیم‌گیری و نیز کاهش هزینه‌ها شد؟

فرضیه رابطه بین تنش واقعی و تنش محاسبه شده از روش استاندارد ASTM قابل پیش‌بینی می‌باشد. واژه های کلیدی این پروژه عبارتند از:

و (تنش‌های پسماند) Topological, Residual Stresses, Surface Integrity (وضعیت سطح), Machining Processes (ماشین‌کاری), Cracking, Hole Drilling Strain Gage method (الاستیک خطی) Linear Elastic, تکنیک کرنش‌سنجی سوراخ method

فهرست مطالب

صفحه

a	موضوع
b	تقدیم به
c	چکیده
d	فهرست مطالب
f	فهرست علایم و اختصارات
h	فهرست جداول
i	فهرست شکل ها

فصل اول

کلیات

۲	(۱-۱) تعریف مساله تحقیق
۱۲	(۱-۲) اهمیت و ضرورت موضوع
۱۲	(۱-۳) هدف و حدود تحقیق
۱۳	(۱-۴) پرسشها و فرضیات تحقیق

فصل دوم

مروری بر ادبیات موضوع تحقیق

۱۵	(۲-۱) مرور ادبیات از دیدگاه نظری
۱۶	(۲-۲) مرور ادبیات از دیدگاه تجربی
۲۴	(۲-۳) روش تحقیق

فصل سوم

اندازه گیری ، جمع آوری و سازماندهی اطلاعات

۲۶	(۳-۱) تهیه و ساخت نمونه های آزمایشی
۲۶	(۳-۱-۱) انتخاب جنس
۲۶	(۳-۱-۲) طراحی ابعاد
۲۶	(۳-۱-۳) آماده سازی نمونه ها
۲۷	(۳-۱-۴) عملیات تنش زدایی

- ۲۹ (۳-۲) انجام عملیات ماشین کاری طبق جدول آزمایشات
 ۳۰ (۳-۳) انجام اندازه گیری تنش های پسماند

فصل چهارم

برآورد عوامل موثر بر اندازه تنش های پسماند جوشی

- ۴۷ (۴-۱) تحلیل تجربی عوامل موثر بر اندازه تنش های ماکزیمم پسماند جوشی
 ۴۸ (۴-۱-۱) برآورد الگوی تنش ماکزیمم جوشی نمونه شماره یک
 ۴۹ (۴-۱-۲) برآورد الگوی تنش ماکزیمم جوشی نمونه شماره دو
 ۵۱ (۴-۱-۳) برآورد الگوی تنش ماکزیمم جوشی نمونه شماره سوم
 ۵۲ (۴-۱-۴) برآورد الگوی تنش ماکزیمم جوشی نمونه شماره چهارم
 ۵۴ (۴-۱-۵) برآورد الگوی تنش ماکزیمم جوشی نمونه شماره پنجم
 ۵۵ (۴-۱-۶) برآورد الگوی تنش ماکزیمم جوشی نمونه شماره ششم
 ۵۷ (۴-۲) تحلیل تجربی عوامل موثر بر اندازه تنش های مینیمم پسماند جوشی
 ۵۷ (۴-۲-۱) برآورد الگوی تنش مینیمم جوشی نمونه شماره یک
 ۵۹ (۴-۲-۲) برآورد الگوی تنش مینیمم جوشی نمونه شماره دو
 ۶۰ (۴-۲-۳) برآورد الگوی تنش مینیمم جوشی نمونه شماره سه
 ۶۱ (۴-۲-۴) برآورد الگوی تنش مینیمم جوشی نمونه شماره چهارم
 ۶۲ (۴-۲-۵) برآورد الگوی تنش مینیمم جوشی نمونه شماره پنجم
 ۶۴ (۴-۲-۶) برآورد الگوی تنش مینیمم جوشی نمونه شماره ششم

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۶۹ (۵-۱) نتیجه گیری
 ۷۰ (۵-۲) خطاهای محتمل در اندازه گیری تنش پسماند

۷۲ پیوست

فهرست علائم و اختصارات

V	سرعت برشی
D	قطر تیغ فرز
n	سرعت دورانی محور
f_r	نرخ پیشروی به ازاء هر دور دوران ابزار
f_t	نرخ پیشروی به ازاء هر دندانۀ یا لبۀ برش
z	تعداد دندانۀ تیغ فرز
a_p	عمق برش محوری
a_e	عمق برش شعاعی
h_m	ضخامت متوسط براده
τ_s	استحکام برشی جنس قطعه کار
ϕ	زاویۀ صفحه برش
A_s	سطح مقطع براده برداشته شده
F_s	نیروی لازم برای برش قطعه کار روی صفحه برش
F_c	مؤلفۀ نیروی برشی ناشی از نیروی ابزار
F_t	مؤلفۀ نیروی Thrust ناشی از نیروی ابزار
A_c	سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته
A_r	سطح تماس واقعی که بار را تحمل می کند
γ_m	قسمتی از سطح تماس واقعی که بار را تحمل می کند
F_f	نیروی لازم برای برش اتصال ایجاد شده بین ناهمواریهای سطوح
τ_1	استحکام برشی فلز نرمتر
τ_2	استحکام برشی لایۀ روانکار نرمتر
XRD	روش پراش اشعه ایکس
σ_{22} و σ_{11}	تنشهای اصلی در مدل تنش مسطح الاستیک
σ_{33}	مؤلفۀ عمودی تنش اصلی
ψ	شیب تغییرات فواصل اتمی ناشی از تنش یک محوری
σ_ϕ	تنش یک محوری
2 θ	زاویۀ تفرق

$d\phi\psi$	فواصل بین لایه‌های اتمی اندازه‌گیری شده در جهات ψ و ϕ
d_0	فواصل بین لایه‌های اتمی در جسم عاری از تنش
W_2, W_1	جنس نمونه‌ها
Ac_1	رنج انتقال در دیاگرام آهن-کربن برای فولادهای فریتی
T	درجه حرارت
t	زمان
ASTM	انجمن تست و مواد آمریکا
E	مدول یانگ
E_p	مدول پلاستیک
m	نسبت مدول پلاستیک به الاستیک
σ_a	تنش اعمال شده
σ_{max} و σ_{min}	تنشهای اصلی (ماکزیمم و مینیمم)
σ_r و σ_t	تنشهای شعاعی و مماسی
$\epsilon_r, \epsilon_\theta$	کرنشهای شعاعی و مماسی
v	ضریب پواسون
σ_x, σ_y	تنش در جهت X و Y
R	فاصله مرکز کرنش سنج از مرکز سوراخ
D	قطر کرنش سنج
$A, B, \bar{A}, \bar{B}, \bar{a}, \bar{b}$	زاویه
ϵ	کرنش
Z	عمق سوراخ
MPa, GPa	واحدهای تنش
X, Y, Z	محورهای مختصات
rpm	واحد سرعت دوران

فهرست جداول

صفحه

۱۱	جدول (۱-۱): اندازه‌گیری سختی لایه های سخت کاری شده.
۲۳	جدول (۲-۱): جدول آزمایشات.
۲۳	جدول (۲-۲): مقادیر انتخابی برای پارامترهای مندرج در جدول آزمایشات.
۳۲	جدول (۳-۱): نتایج اندازه‌گیری تنشهای پسماند حاصل از فرزکاری نمونه (۱).
۳۳	جدول (۳-۲): نتایج اندازه‌گیری تنشهای پسماند حاصل از فرزکاری نمونه (۲).
۳۴	جدول (۳-۳): نتایج اندازه‌گیری تنشهای پسماند حاصل از فرزکاری نمونه (۳).
۳۵	جدول (۳-۴): نتایج اندازه‌گیری تنشهای پسماند حاصل از فرزکاری نمونه (۴).
۳۶	جدول (۳-۵): نتایج اندازه‌گیری تنشهای پسماند حاصل از فرزکاری نمونه (۵).
۳۷	جدول (۳-۶): نتایج اندازه‌گیری تنشهای پسماند حاصل از فرزکاری نمونه (۶).
۴۸	جدول (۴-۱): نتایج حاصل از برآورد الگوی تنش ماکزیمم مربوط به نمونه (۱).
۵۰	جدول (۴-۲): نتایج حاصل از برآورد الگوی تنش ماکزیمم مربوط به نمونه (۲).
۵۱	جدول (۴-۳): نتایج حاصل از برآورد الگوی تنش ماکزیمم مربوط به نمونه (۳).
۵۳	جدول (۴-۴): نتایج حاصل از برآورد الگوی تنش ماکزیمم مربوط به نمونه (۴).
۵۴	جدول (۴-۵): نتایج حاصل از برآورد الگوی تنش ماکزیمم مربوط به نمونه (۵).
۵۵	جدول (۴-۶): نتایج حاصل از برآورد الگوی تنش ماکزیمم مربوط به نمونه (۶).
۵۸	جدول (۴-۷): نتایج حاصل از برآورد الگوی تنش مینیمم مربوط به نمونه (۱).
۵۹	جدول (۴-۸): نتایج حاصل از برآورد الگوی تنش مینیمم مربوط به نمونه (۲).
۶۰	جدول (۴-۹): نتایج حاصل از برآورد الگوی تنش مینیمم مربوط به نمونه (۳).
۶۱	جدول (۴-۱۰): نتایج حاصل از برآورد الگوی تنش مینیمم مربوط به نمونه (۴).
۶۳	جدول (۴-۱۱): نتایج حاصل از برآورد الگوی تنش مینیمم مربوط به نمونه (۵).
۶۴	جدول (۴-۱۲): نتایج حاصل از برآورد الگوی تنش مینیمم مربوط به نمونه (۶).

فهرست شکلها

صفحه

- شکل (۱-۱): تنشهای پسماند در خمش تیر . ۲
- شکل (۱-۲): نمودارهای ایده آل تنشهای پسماند در خمش تیر. ۳
- شکل (۱-۳): تنشهای پسماند در پیچش. ۳
- شکل (۱-۴): تأثیر تنشهای پسماند ناشی از کربورایزینگ و سخت کاری. ۵
- شکل (۱-۵): توزیع تنشهای پسماند ناشی از کربورایزینگ و سخت کاری. ۶
- شکل (۱-۶): شکست ناشی از تنشهای کششی بالا در اثر نیتريده کردن ۷
- شکل (۱-۷): تأثیر تنشهای داخلی ناشی از سخت کاری القایی. ۷
- شکل (۱-۸): دیاگرام تنشهای سطحی و زیر سطحی در یک میله مدور ناشی از سخت کاری سطحی. ۹
- شکل (۱-۹): تنشهای پسماند ناشی از سنگ زنی. ۱۱
- شکل (۲-۱): پارامترهای اصلی در عملیات فرزکاری کف تراشی. ۱۵
- شکل (۲-۲): فرآیندهای فرزکاری مختلف. ۱۶
- شکل (۲-۳): مدل صفحه برش در تشکیل براده پیوسته. ۱۹
- شکل (۲-۴): لغزش بین سطوح با لایه روانکار جامد. ۲۲
- شکل (۳-۱): رابطه بین زمان و درجه حرارت در آزادسازی تنشهای پسماند در فولاد. ۲۷
- شکل (۳-۲): تغییرات استحکام تسلیم با درجه حرارت برای سه کلاس فولاد. ۲۸
- شکل (۳-۳): ماشین فرز اونیورسال FP4M- ماشین سازی تبریز . ۲۹
- شکل (۳-۴): محورهای مختصات ماشین فرز FP4M. ۳۰
- شکل (۳-۵): مسیر حرکت ابزار فرزکاری روی سطح قطعه کار. ۳۰
- شکل (۳-۶): محل اندازه گیری تنش پسماند روی نمونه ها. ۳۱
- شکل (۳-۷): تغییرات تنش ماکزیمم بر حسب عمق برای نمونه های (۱) و (۲). ۳۸
- شکل (۳-۸): تغییرات تنش مینیمم بر حسب عمق برای نمونه های (۱) و (۲). ۳۸
- شکل (۳-۹): تغییرات تنش ماکزیمم بر حسب عمق برای نمونه های (۲) و (۳). ۳۹
- شکل (۳-۱۰): تغییرات تنش ماکزیمم بر حسب عمق برای نمونه های (۳) و (۴). ۴۰
- شکل (۳-۱۱): تغییرات تنش مینیمم بر حسب عمق برای نمونه های (۳) و (۴). ۴۰
- شکل (۳-۱۲): تأثیر سختی بر روی انرژی مخصوص تراش. ۴۱
- شکل (۳-۱۳): مناطق تغییر فرم در فرآیندهای براده برداری (برش فلزات). ۴۲
- شکل (۳-۱۴): تغییرات تنش ماکزیمم بر حسب عمق برای نمونه های (۴) و (۵). ۴۲
- شکل (۳-۱۵): تغییرات تنش مینیمم بر حسب عمق برای نمونه های (۴) و (۵). ۴۳
- شکل (۳-۱۶): تغییرات تنش ماکزیمم بر حسب عمق برای نمونه های (۵) و (۶). ۴۴
- شکل (۳-۱۷): تغییرات تنش مینیمم بر حسب عمق برای نمونه های (۵) و (۶). ۴۴
- شکل (۴-۱): نمودار مقدار تنش های ماکزیمم جوشی مربوط به نمونه یک . ۴۹
- شکل (۴-۲): نمودار مقدار تنش های ماکزیمم جوشی مربوط به نمونه دو . ۵۰
- شکل (۴-۳): نمودار مقدار تنش های ماکزیمم جوشی مربوط به نمونه سه . ۵۲
- شکل (۴-۴): نمودار مقدار تنش های ماکزیمم جوشی مربوط به نمونه چهار . ۵۳
- شکل (۴-۵): نمودار مقدار تنش های ماکزیمم جوشی مربوط به نمونه پنجم. ۵۴

- شکل (۴-۶): نمودار مقدار تنش های ماکزیمم جوشی مربوط به نمونه ششم. ۵۶
- شکل (۴-۷): نمودار مقدار تنش های مینیمم جوشی مربوط به نمونه اول . ۵۸
- شکل (۴-۸): نمودار مقدار تنش های مینیمم جوشی مربوط به نمونه دوم . ۵۹
- شکل (۴-۹): نمودار مقدار تنش های مینیمم جوشی مربوط به نمونه سوم . ۶۰
- شکل (۴-۱۰): نمودار مقدار تنش های مینیمم جوشی مربوط به نمونه چهارم . ۶۱
- شکل (۴-۱۱): نمودار مقدار تنش های مینیمم جوشی مربوط به نمونه پنجم . ۶۳
- شکل (۴-۱۲): نمودار مقدار تنش های مینیمم جوشی مربوط به نمونه ششم . ۶۴
- شکل (۴-۱۳): توزیع درجه حرارت در قطعه کار و براده . ۶۵
- شکل (۴-۱۴): تأثیرات سرعت برشی بر انرژی مخصوص تراش. ۶۶
- شکل (۴-۱۶): تأثیرات عمق برش بر انرژی مخصوص تراش . ۶۷

فصل اول

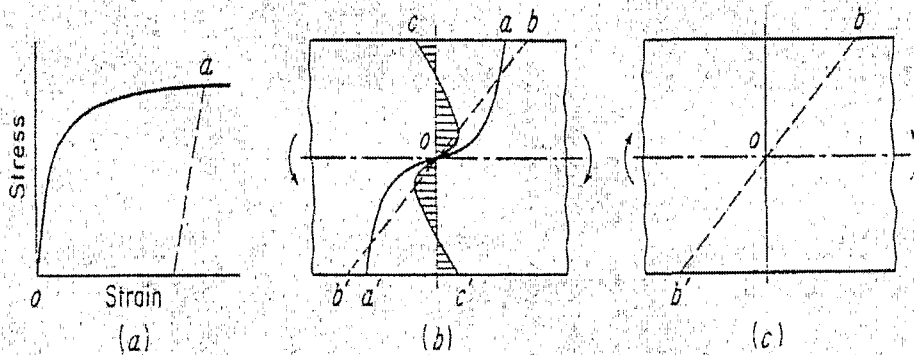
کلیات

فصل اول : کلیات

(۱-۱) تعریف مساله تحقیق

هنگامی که یک میله فولادی راست خم می‌گردد، بطوری که تنش‌های ایجاد شده در درون جسم در حد تنش الاستیک ماده باشد، بعد از برداشتن تنش خمش (ممان) خارجی، میله شکل اصلی خود را باز خواهد یافت. با این وجود اگر میله خم شود بطوریکه تنش‌ها از حد الاستیک تجاوز کند، جریان پلاستیک وجود خواهد داشت، طوری که بعد از برداشتن ممان خمشی خارجی میله تا حدی شکل اولیه خود را باز خواهد یافت و دلیل این امر وجود ممان داخلی الاستیک بدلیل وجود تنش‌های الاستیک در قسمتی از میله است؛ در این حالت تنش‌ها در قسمتی که از جریان پلاستیک وجود داشته است صفر نخواهد شد و خود را به شکل تنش‌های پسماند نشان خواهد داد. فرض کنید میله‌ای از جنسی ساخته شده است که نمودارهای تنش-کرنش آن در حالت فشار و کشش مانند شکل (۱-۱) باشد. اگر میله طوری خم شود که تنش‌ها مانند شکل (ب-۱) از حد الاستیک تجاوز کند، خطوط oa و oa' به ترتیب نشان دهنده نحوه توزیع تنش‌های کششی و فشاری هستند. منحنی‌های oa و oa' در شکل (ب-۱) نمودارهای تنش-کرنش مینیاتوری هستند. با فرض اینکه ماده حین باربرداری از «قانون هوک»^۱ تبعیت کند (خطوط نقطه چین در شکل (آ-۱))، توزیع تنش باربرداری در شکل (ج-۱) نشان داده شده است.

شکل (۱-۱) : تنش‌های پسماند در خمش تیر



منبع: آلمن و بلک^۲ (۱۹۶۳؛ ۳۰)

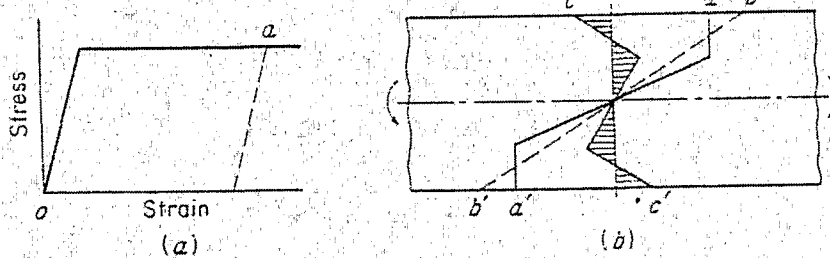
^۱ Hook's Law

^۲ Almen & Black

لازم به ذکر است که ممان لازم برای خم کردن تیر، همانطور که توسط دیاگرام توزیع تنش σa در شکل (آ-۱) نشان داده شده است، برابر است با ممان نشان داده شده توسط دیاگرام باربرداری ρb . روش تعیین نتیجه یا همان تنش‌های پسماند عبارت است از کم کردن توزیع تنش باربرداری از توزیع تنش غیر الاستیک. این کار در شکل (ب-۱) انجام شده است که تنش‌های پسماند را توسط هاشور نشان می‌دهد؛ قسمت بالایی میله که تحت تنش‌های غیر الاستیک بود (نقطه a)، حال دارای تنش‌های پسماند فشاری است (نقطه c) و قسمت پایینی که در ابتدا تحت تنش‌های فشاری بود، حال دارای تنش‌های پسماند کششی (نقطه c') است.

شکل (آ-۲) یک نمودار تنش-کرنش الاستیک و پلاستیک ایده‌آل را نشان می‌دهد که می‌تواند جایگزین نمودار عملی شکل (آ-۱) با تقریب‌های قابل قبول برای نتایج حاصله با مواد چکش‌خوار^۱ شود. استفاده از این نمودار ایده‌آل به نمودارهای شکل (ب-۲) منجر می‌شود که جایگزین قابل قبولی برای شکل (آ-۱) است.

شکل (ب-۲): نمودارهای ایده‌آل تنش‌های پسماند در خمش تیر

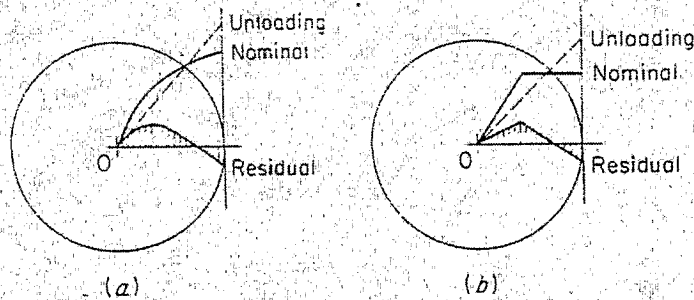


منبع: آلمن و بلک (۱۹۶۳؛ ۳۳)

روش‌های تخمین و نمایش تنش‌های پسماند که در شکل‌های (ب-۲) و (ب-۱) نشان داده شده، می‌تواند مانند شکل (ب-۳) برای پیچش نیز بکار رود. فقط باید ممان پیچشی نشان داده شده توزیع تنش برشی برای حالت باربرداری با ممان پیچشی حالت بارگذاری برابر باشد.

¹ Ductile

شکل (۱-۳) : تنش‌های پسماند در پیچش



منبع: آلمن و بلک (۱۹۶۳؛ ۳۴)

تنش‌های پسماند ناشی از منابع حرارتی و متالورژیکی، بسته به بزرگی و نحوه توزیع آنها (خصوصاً در بارگذاری خستگی) می‌توانند مضر یا مفید باشند. به دلیل وجود متغیرهای بسیار زیاد در طراحی یک قطعه نظیر شکل هندسی، نحوه بارگذاری و غیره، تنش‌های پسماند ناشی از منابع حرارتی در اینجا اساساً با ذکر مثال مورد بحث قرار می‌گیرند.

الف- سرد کردن ۱

تنش‌های پسماند ناشی از سرد کردن از دماهای نسبتاً پایین، ممکن است به مقادیر قابل ملاحظه‌ای برسند و بسته به اینکه آیا این تنش‌های پسماند تنش‌های کششی حاصل از بارگذاری را افزایش یا کاهش می‌دهند، ممکن است مفید یا مضر باشند. یک حالت جالب از این مورد در سه سیلندر آلومینیومی که با آب خنک می‌شود، اتفاق افتاد که در آن بعلت خستگی روی دیواره منطقه سوخت که سمت جریان آب قرار دارد، شکست رخ داد. آزمایش‌ها نشان داد که دیواره سمت جریان آب تحت تنش‌های کششی و سمت دیگر دیواره تحت تنش فشاری قرار دارد. نمودار تنش داخلی ناشی از سرد کردن همانند نمودار تنش حاصل از فشار گاز بود، بنابراین برآیند تنش‌ها مجموع این دو تنش بود.

در این حالت تنش‌های پسماند در اثر سرد کردن سریع سرسیلندر از دمای 980°F با غوطه‌ورسازی در آب سرد شدند. سطوح خارجی قطعه ریخته‌گری شده خنک شدند در حالیکه سطوح داخلی بویژه در قسمت‌های ضخیم هنوز داغ بودند. هنگامی که سطوح خارجی خنک می‌شوند، انقباض حرارتی تنش‌های فشاری را با چنان مقادیری ایجاد می‌کند که سبب ایجاد تنش تسلیم در سطوح داغتر و ضعیف‌تر می‌شود. هنگامی که عمل سرد کردن ادامه می‌یابد، فلزی که تا زیر نقطه تسلیم تحت تنش بوده است، بصورت گرمایی منقبض می‌شود و تنش کششی را سمت واتر جکت ۲ و تنش فشاری را سمت محفظه سوخت وارد می‌کند. دیواره بیرونی واتر جکت که تحت

¹ Quenching

² Water-Jacket

تنش‌های فشاری قرار دارد، به حفظ تنش‌های پسماند در دیواره ضخیم محفظه احتراق کمک می‌کند.

برای اصلاح تنش‌های پسماند نامطلوب، همانگونه که با آزمایشات روی تقاطع سرسیلندر نشان داده شد، با سرد کردن داخلی از طریق وارد کردن آب سرد در واتر جکت صوت گرفت. هنگامی که سرسیلندر از داخل سرد می‌گردد، الگوی تنش در دیواره محوظه احتراق معکوس می‌گردد و سمت داخلی تحت تنش فشاری و سمت خارجی تحت تنش کششی قرار می‌گیرد. چون علامت این تنش‌های پسماند با علامت تنش‌های کاری متفاوت است، تنش برآیند به جای مجموع در حالتی که قطعه از بیرون سرد می‌شد، اختلاف این تنش‌هاست.

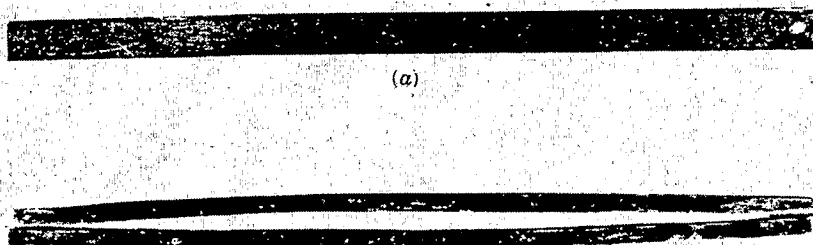
پس از انجام آزمایش‌های خستگی روی سیلندره‌های خنک شده با هر دو روش، مشخص شد که سیکل‌های تنش تا شکست به مقدار ۲ تا ۳ میلیون سیکل برای سرسیلندره‌های خنک شده از خارج به ۵ تا ۶ میلیون سیکل برای قطعات خنک شده از داخل افزایش یافته است.

تنش‌های پسماند مشابهی نیز در قطعات گرم و سرد شده آلومینیومی اتفاق می‌افتد و بسیاری از این قطعات هنگامی که در دماهای بالاتری نسبت به دماهایی که بیشترین استحکام کششی را می‌دهند قرار بگیرند، مقاومت خستگی بهتری از خود نشان می‌دهند. دلیل این امر کاهش تنش‌های پسماند نامطلوب ناشی از سرد کردن است. در قطعات فولادی می‌توان با کنترل دمای تمپر کردن و کاربرد صحیح مایع خنک کاری به مزایای فوق‌الذکر دست یافت. مطلوب یا نامطلوب بودن تنش‌های پسماند به شکل قطعه، گرادیان درجه حرارت و جهت جریان گرما بستگی دارد.

ب- کربوره کردن^۱

نمونه نشان داده شده در شکل (۴-۱)، تنش پسماند فشاری را نشان می‌دهد که در اثر عملیات کربوره کردن گسترش می‌یابد.

شکل (۴-۱): تأثیر تنش‌های پسماند ناشی از کربورایزینگ و سخت کاری



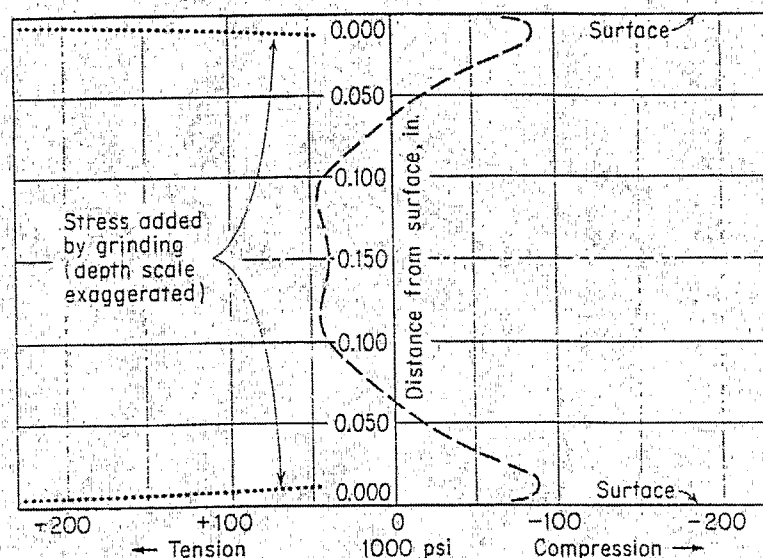
منبع: آلمن و بلک (۱۹۶۳؛ ۳۷)

¹ Carburizing

وجه‌های مقابل یک میله فولادی کم کربن به طول ۹ اینچ و سطح مقطع ۱/۲ اینچ مربع کربوره شدند نیز دو وجه دیگر با یک صفحه فلزی در برابر کربوره شدن محافظت شدند. بعد از سرد کردن، همانگونه که در شکل (۱-۴) مشاهده می‌شود، میله خمیده شد. با ابره‌کشی طولی وجه‌های کربوره شده به دو قسمت تقسیم شدند و همانطور که در شکل (ب-۴) نشان داده شده است، هر دو نیمه خم شدند. دلیل این امر تنش پسماند فشاری بود که با افزایش حجم فلز سخت‌شده در لایه‌های کربوره شده توسعه یافت و نیز ناشی از تنش پسماند کششی بود که در هسته کربوره نشده برای تعادل نیرویی گسترش پیدا کرده بود.

انحنای مشاهده شده ثابت نمی‌کند که کل ضخامت لایه‌های کربوره شده، تحت تنش فشاری پسماند قرار داشتند. اگر بخشی از فلز کربوره نشده تحت تنش کششی پسماند قرار داشته باشد، همین انحنای نیز ایجاد می‌گردد. لازم به ذکر است که این تنش کششی زمانی بوجود می‌آید که تنش‌های ناپایدار دارای مقدار بزرگ به دلیل شیب تند دمایی هنگام سرد کردن سبب قرار گرفتن تنش تسلیم پلاستیک و موضعی روی تنش‌های فشاری در فلز سخت شده به دلیل افزایش حجم گردد. تخمین الگوی تنش مربوطه به بار پلاستیکی موضعی، به دلیل متغیرهای بسیار مثل شدت سرد کردن، خصوصیات واسطه سرد کردن، سرعت سطحی مایع خنک‌کاری، سطح مقطع فلز و شکل قطعه سرد شده، مشکل می‌باشد. تجزیه و تحلیل تنش‌های داخلی در قطعه کربوره شده، توزیع تنش نشان داده شده در شکل (۱-۵) را نشان می‌دهد یعنی فشار در سطوح خارجی و کششی در هسته.

شکل (۱-۵): توزیع تنش‌های پسماند ناشی از کربورایزینگ و سخت‌کاری



منبع: آلمن و بلک (۱۹۶۳؛ ۴۰)

ج-نیتزیده کردن^۱

در اثر افزایش حجم ناشی از نیتزیده کردن، تنش‌های سطحی فشاری همانند کربورایزینگ بوجود می‌آیند و مقاومت در برابر خستگی قطعه افزایش می‌یابد. همانگونه که قبلاً بحث شد، دو دلیل برای این افزایش وجود دارد:

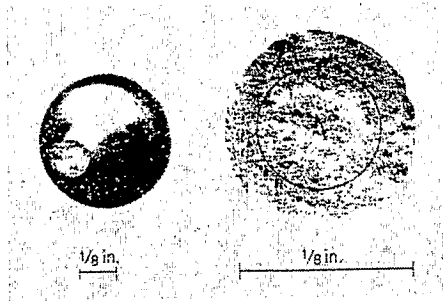
استحکام بخشی و تقویت لایه سطحی.

وارد ساختن تنش فشاری در لایه سطحی که انتشار ترک‌های ناشی از خستگی را که از سطح نشأت می‌گیرند، کاهش می‌دهد.

اگرچه تجربه عادی نیتزیده کردن به این است که تا حد زیادی مقاومت در برابر خستگی را افزایش می‌دهد، اما امکان به حد افراط رساندن این مقاومت وجود دارد، درست همانطوریکه امکان به حد افراط رساندن تنش فشاری سطحی با روش مکانیکی وجود دارد. البته تنش فشاری زیادی که از نیتزیده کردن ناشی می‌شود، باید از طریق تنش کششی داخلی با مقدار برابر، بالانس شود. هنگامی که مقاطع نازک تحت ازت‌دهی عمیق قرار می‌گیرند، ممکن است تنش کششی داخلی به مقادیر خطرناک برسد.

شکل (۱-۶) یک Firing Pin را نشان می‌دهد که در نتیجه نیتزیده کردن، استحکام آن تا حد زیادی کاهش یافته است. قطر ناحیه معیوب تقریباً $1/8$ اینچ بود. عمق لایه نیتزیده شده در حدود 0.020 اینچ بود.

شکل (۱-۶) : شکست ناشی از تنشهای کششی بالا در اثر نیتزیده کردن

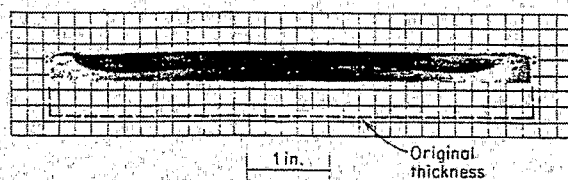


منبع: آلمن و بلک (۱۹۶۳؛ ۴۴)

همانطور که با دایره نشان داده شده است، مساحت این منطقه که 60% مساحت منطقه معیوب می‌باشد. از نمودار تنش فشاری (شکل (۱-۷)) مشخص می‌شود که تنش کششی داخلی که برای بالانس کردن تنش زیاد ناشی از نیتزیده کردن ایجاد گردید، باید خیلی زیاد باشد.

¹ Nitriding

شکل (۷-۱): تأثیر تنش‌های داخلی ناشی از سخت‌کاری القایی.



منبع: آلمن و بلک (۱۹۶۳؛ ۴۷)

مشخص است که لوله‌های سیلندر دارای دیواره نازک که از داخل نیتزیده می‌شوند، بیشتر از لوله‌های سیلندری نیتزیده نشده در اثر ترک خوردگی، بیشتر مستعد خستگی هستند. چنین ترک‌هایی در لایه نیتزیده شده روی می‌دهد زیرا مجموع تنش فشاری پسماند (در حدود 140000 psi) و تنش مربوط به فشار گاز از حد الاستیک فولاد نرم نیتزیده شده بیشتر می‌باشد. پس بار پلاستیک فلز نیتزیده نشده، تنش پسماند فشاری در لایه نیتزیده نشده را پراکنده می‌سازد. این لایه نسبتاً ضعیف و ترد و شکننده می‌گردد بطوریکه شکست روی می‌دهد. بنابراین در نیتزیده کردن مقاطع نازک باید دقت نمود تا عمق لایه نیتزیده شده متناسب با ضخامت مقطعی که باید نیتزیده شود، اندازه‌گیری شود.

د- سخت‌کاری القائی^۲ و سخت‌کاری با شعله^۳

تنش پسماند در میل‌لنگ‌ها و دیگر قطعاتی که با گرمای القائی و با شعله سخت‌کاری می‌شوند، همانگونه که در شکل (۷-۱) نشان داده می‌شود، مشابه تنش پسماند در قطعات کربوره شده و سخت شده است. سطح بالایی سخت شده این نمونه در ابتدا راست و مستقیم بود، ولی بعد از برداشتن موادی که با خط‌چین مشخص است، سطح بالایی محدب می‌گردد که تنش سطحی فشاری را نشان می‌دهد. در سخت‌کاری القائی، سخت‌کاری با شعله و سرد کردن شدید، مانند عملیات کربورایزینگ و نیتزیده کردن باید دقت کرد تا به یک الگوی بهینه تنش پسماند برای دستیابی به حداکثر مقاومت در برابر خستگی دست یافت و از توزیع اشتباه تنش پسماند که مقاومت در برابر خستگی را کاهش می‌دهد، اجتناب کرد. قطعات کربوره شده در برابر خستگی مقاوم هستند زیرا لایه کربوره شده تحت تنش فشاری بالایی می‌باشد و نیز مقاومت لایه خارجی کربوره شده از طریق افزایش سختی، افزایش می‌یابد. هنگامی که یک استوانه حرارت داده شده سریعاً سرد می‌شود، انقباض لایه‌های خارجی مواد داخلی پلاستیک را بیش از مقدار استحکام تسلیم در فشار، تحت تنش قرار می‌دهد. هنگامی که خنک

¹ Barrel

² Induction Hardening

³ Flame Hardening

کردن ادامه می‌یابد، مواد داخلی نیز منقبض می‌شوند که این امر باعث می‌شود که لایه‌های خارجی دارای تنش کششی تحت تنش فشاری قرار بگیرند. همچنین به دلیل مقدار زیاد کربن در لایه کربوره شده، این لایه حین سرد شدن به مارتنزیت و حجم بزرگتری تبدیل می‌شود و تنش سطحی فشاری که در اثر انقباض گرمایی ایجاد شده است، افزایش می‌دهد. در سختکاری با شعله و سخت کاری القائی، توالی اتفاقات برعکس کربورایزینگ است، بنابراین تنشی که در ماده سطحی در اثر انقباض گرمایی بوجود می‌آید، کششی است. در چنین سخت کاری سطحی، ماده خارجی وارد منطقه پلاستیک می‌شود در حالیکه مواد داخلی هنوز سرد و صلب هستند. لایه خارجی داغ منبسط می‌گردد اما با مواد داخلی سرد مقید می‌شود. این تغییر شکل، پلاستیک است. در ادامه سرد کردن، در اثر انقباض گرمایی لایه خارجی تغییر شکل یافته روی هسته داخلی سرد و الاستیک، منجر به کشش این لایه می‌شود و بنابراین قطعه در برابر خستگی ضعیف است.

با این وجود هنگامی که فولاد قابل سخت کاری از بالای دمای سخت کاری سرد شود، یک تغییر فاز به مارتنزیت با حجم بیشتر اتفاق می‌افتد. این افزایش حجم به تنهایی باعث ایجاد تنش فشاری در لایه تغییر شکل یافته می‌شود. تنش پسماند خالص سطحی در فولاد سخت کاری شده، جمع جبری تنش کششی حاصل از انقباض گرمایی و تنش فشاری حاصل از تغییر شکل است. در نمونه‌های اندازه‌گیری شده مشخص شد که سطح تحت تنش فشاری حدود 30000 psi تا 40000 psi بود.

تاکنون وقایع مختلفی که در یک لایه سخت کاری شده در نتیجه گرم و سرد کردن (بدون کربورایزینگ) روی می‌دهد توضیح داده شد. حال باید تعیین کرد که برای مواد زیر آن لایه که تا بالای دمای سخت کاری گرم شده بودند، چه روی می‌دهد. همانطور که در شکل (۸-۱) نشان داده شده است، سه نقطه را می‌توان تصور کرد:

لایه بیرونی که تا بالای دمای سخت کاری گرم می‌شود.
لایه ثانویه که زیر دمای سخت کاری گرم می‌شود.
مواد هسته که اصلاً گرم نمی‌شوند.

لایه بیرونی که از یک دمای بالا که برای سخت کاری لازم است سریعاً سرد می‌شود، همانگونه که در شکل (۸-۱) نشان داده شده است، به دلیل تغییر فازی که در اثر گرم کردن روی می‌دهد تحت تنش فشاری قرار دارد. با این وجود لایه ثانویه این تغییر فاز را تجربه نمی‌کند، اگر چه به اندازه کافی گرم است تا آنیل شود و سپس خنک شود. این لایه به دلیل خنک شدن تنها انقباض گرمایی را تجربه می‌کند و مانند شکل (ب-۸-۱) تحت تنش کششی است.