

ساجمه زنی و عمر خستگی

مؤلفان :

مهندس سلمان تیموریان مطلق

(شرکت پشتیبانی و نوسازی بالگردهای ایران)

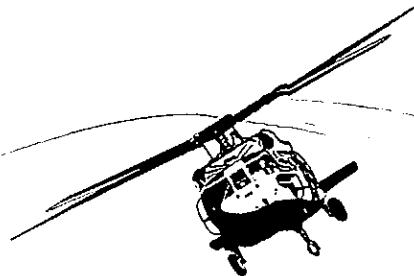
رامین جلودار دزفولی

(شرکت پشتیبانی و نوسازی بالگردهای ایران)

سرشناسه : تیموریان مطلق، سلمان، ۱۳۶۳ -
 عنوان و نام پدیدآور : ساچمه‌زنی و عمر خستگی/مؤلفان سلمان تیموریان مطلق، رامین
 جلودار دزفولی؛ به سفارش شرکت پشتیبانی و نوسازی هلیکوپترهای
 ایران (بنها).
 تهران: سپهر نو، ۱۳۹۲.
 ۱۷۶ ص.: مصور، جدول، نمودار.
 شابک : 978-600-90136-4-7
 وضعیت فهرست نویسی : فیبا
 یادداشت : کتابنامه: ص. ۱۷۱.
 موضوع : ساچمه‌زنی
 موضوع : تنش‌های پسماند
 شناسه افزوده : جلودار دزفولی، رامین، ۱۳۶۸ -
 شناسه افزوده : شرکت پشتیبانی و نوسازی هلیکوپترهای ایران
 رده بندی کنگره : ۱۳۹۲ س ۹/ت ۶۵۴/TS
 رده بندی دیویی : ۶۷۱/۷
 علامت تائیدشناسی ملی : ۳۳۱۳۱۱۰



نام کتاب :	ساچمه‌زنی و عمر خستگی
ناشر :	انتشارات سپهر نو
مؤلفان :	سلمان تیموریان مطلق - رامین جلودار دزفولی
ویراستار :	محسن پورحسین
صفحه‌آرایی :	هفت‌رنگ گرافیک (پریساراستگویی)
لیتوگرافی :	رایید گرافیک
نوبت چاپ :	اول - بهار ۱۳۹۳
چاپ :	چام طلایی
صحافی :	کیمیا
ناظر فنی چاپ :	محسن پورحسین
تیراژ :	۵۰۰ جلد
قیمت :	۸۸۰۰۰ ریال
شابک :	۹۷۸-۶۰۰-۹۰۱۳۶-۴-۷
به سفارش شرکت پشتیبانی و نوسازی هلیکوپترهای ایران، (بنها)	



فهرست مطالب

۱۵	پیشگفتار مدیر عامل
۱۷	پیشگفتار مؤلفان
۱۹	مقدمه

فصل ۱

۲۱	شکست خستگی
۲۲	۱-۱-۱ منحنی S-N و حد خستگی فلزات
۲۴	۲-۱-۲ خصوصیات ساختاری خستگی
۲۵	۳-۱-۳ عوامل موثر بر خستگی

فصل ۲

۳۱	تنش پسماند
۳۲	۱-۲-۱ انواع تنش‌های پسماند
۳۲	۲-۲-۱ تاثیر روش‌های ساخت بر تنش‌های پسماند
۳۳	۱-۲-۲ فرآیندهای ساخت مفید
۳۳	۲-۲-۲ فرآیندهای ساخت مضر

فصل ۳

۳	۴۱	روش‌های ایجاد تنش‌های پسماند فشاری
	۴۱	۱-۳ روش‌های مکانیکی



- ۴۲ ۱-۱-۳ - ساجمه‌کوبی
- ۴۷ ۱-۱-۱-۳ - استانداردهای مرتبط با فرآیند ساجمه‌زنی
- ۷۴ ۲-۱-۱-۳ - پارامترهای اصلی فرآیند ساجمه‌زنی و آزمایش نوار آلمن
- ۸۹ ۳-۱-۱-۳ - کاربردهای صنعتی ساجمه‌زنی و رده‌بندی جنس قطعات تحت تاثیر
- ۱۰۴ ۴-۱-۱-۳ - خصوصیات ساجمه‌های مورد استفاده در فرآیند ساجمه‌زنی
- ۱۰۹ ۵-۱-۱-۳ - دستگاه‌های ساجمه‌زنی
- ۱۱۶ ۶-۱-۱-۳ - ساجمه‌زنی مجدد
- ۱۲۱ ۷-۱-۱-۳ - فرم دهی بوسیله ساجمه‌زنی
- ۱۲۲ ۸-۱-۱-۳ - ضعف‌های فرآیند ساجمه‌زنی
- ۱۲۴ ۲-۱-۳ - الکتریسیته عمیق (نورد سرد موضعی)
- ۱۴۹ ۱-۳ - شوک الیزری
- ۱۵۷ ۴-۱-۳ - پاشش آب و جت روغن
- ۱۶۱ ۲-۳ - روش‌های خراشی
- ۱۶۲ ۳-۳ - روش‌های حرارتی شیمیایی (پوشش کاری)

فصل ۴

- ۱۶۳ روش‌های اندازه‌گیری تنش‌های پسماند
- ۱۶۴ ۱-۴ - روش تفرق اشعه ایکس
- ۱۶۶ ۲-۴ - روش اولتراسونیک
- ۱۶۶ ۳-۴ - روش سوراخکاری
- ۱۶۷ ۴-۴ - روش سوراخکاری عمیق
- ۱۶۸ ۵-۴ - روش خم‌کاری
- ۱۶۸ ۶-۴ - روش‌های تفرق الکترونی و تفرق نوترونی
- ۱۶۹ ۷-۴ - روش الکترومغناطیسی
- ۱۶۹ ۸-۴ - روش ترموالاستیک
- ۱۶۹ ۹-۴ - روش رامان
- ۱۷۱ مراجع

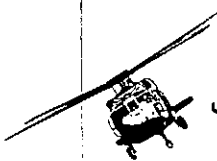


فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ چرخه های تنش خستگی معکوس و نوسانی ۲۳
- شکل ۲-۱ چرخه تنش ۲۳
- شکل ۳-۱ مقایسه نمودار S-N ااریتمی و خطی ۲۴
- شکل ۴-۱ انطباق تنش های پسماند در بارگذاری خمشی ۲۸
- شکل ۱-۲ خستگی ناشی از تنش پسماند شونده برای چند میله سنگ زنی شده با سختی 45HRC ۳۴
- شکل ۲-۲ تنش پسماند در فولاد 4340 با سختی HRC50 بعد از چند نوع سنگ زنی سطحی مختلف ۳۵
- شکل ۳-۲ رفتار خستگی برای سیکل های بالا در Inconel 718 ۳۶
- شکل ۴-۲ وضعیت رفتار خستگی در دورهای بالا پسماند LCM ۳۶
- شکل ۵-۲ عدم انشار ترک های ناشی از روکش کاری به لایه زیرین ۳۷
- شکل ۶-۲ تاثیر آندایز کردن و ساچمه کوبی قبل از آن بر روی عمر خستگی (L1) ۳۸
- شکل ۲-۷ تاثیر کربن زدایی بر تنش پسماند. مقدار کربن زدایی در نصاب ۳۸
- 0.002mm برای منحنی 1 حدود 1 درصد، منحنی 2 حدود 64/0 درصد و منحنی 3 در حدود 35/0 درصد می باشد ۳۹
- شکل ۱-۳ شماتیک پروفیل تنش پسماند در قطعه ساچمه زنی شده ۴۲
- شکل ۲-۳ پروسه ساچمه زنی ۴۳
- شکل ۳-۳ شماتیکی از تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده توسط برخورد یک ساچمه ۴۳
- شکل ۴-۳ توزیع تنش پسماند پس از عملیات ساچمه کوبی ۴۴



- شکل ۳-۵ نمودار استخوان ماهی ایشیکاوا برای فرآیند ساجمه کوبی ۴۷
- شکل ۳-۶ شماتیکی از مفهوم مدت زمان اشباع نسبی (T) ۷۵
- شکل ۳-۷ آزمایش نوار آلمن ۷۸
- شکل ۳-۸ شماتیکی از سیستم عملکردی و اندازه گیری نوار آلمن ۷۹
- شکل ۳-۹ سیستم استاندارد Almen Gauge منطبق بر استاندارد نظامی MIL-S-13165C ۷۹
- شکل ۳-۱۰ دسته بندی نوارهای آلمن ۸۰
- شکل ۳-۱۱ مقایسه ارتفاع آلمن به دست آمده از نوارهای A، C و N ۸۱
- شکل ۳-۱۲ تاثیر ساجمه کوبی بر خستگی تیغه های توربین Inconel 713c ۹۰
- شکل ۳-۱۳ تاثیر ساجمه کوبی در پیشگیری از شکست خستگی در فولاد 4340 ۹۰
- شکل ۳-۱۴ تنش در گدازه های دینامیکی خمشی ۹۰
- شکل ۳-۱۵ تنش خستگی بر روی شفت محور عقب ۹۱
- شکل ۳-۱۶ اجزاء میکرک ترک مناطق در معرض تمرکز تنش ۹۳
- شکل ۳-۱۷ افزایش عمر استقامت میل لنگ ساجمه کوبی شده ۹۳
- شکل ۳-۱۸ افزایش مقاومت خستگی در چرخ دنده های حلزونی ۹۵
- شکل ۳-۱۹ پروفیل تنش در پایه دنده در چرخ دنده کربوره شده که سپس سنگ زنی و ساجمه کوبی شده ۹۶
- شکل ۳-۲۰ خستگی در چرخ دنده های کربوره شده ۹۶
- شکل ۳-۲۱ گستره تنش ایمن برای فنرهای لول در جنس های مختلف ۹۷
- شکل ۳-۲۲ مقایسه منحنی های خستگی برای بارگذاری حلقه و پیچشی ۹۷
- شکل ۳-۲۳ اثر فرآیند ساجمه زنی بر کاهش نرخ از دست دادن ماده سطح جامد در نتیجه از کاویتاسیون ۹۸
- شکل ۳-۲۴ فرآیند hydraulic Wedging و وقوع pitting و سطوح برخورد ۹۹
- شکل ۳-۲۵ مشخصات عمر خستگی ناشی از Pitting دو چرخ دنده ساجمه زنی شده و معمولی با مشخصات عملکردی Synthetic Paraffinic, 10000RPM ۱۰۰
- شکل ۳-۲۶ اثر ساجمه زنی بر افزایش عمر قطعات ساخته شده از چدن نرم معمولی و ماشین کاری شده ۱۰۱



شکل ۳-۲۷ مقایسه خستگی برای نمونه‌های صاف و شکاف دار به عنوان تابعی از

۱۰۲..... UTS فولاد

شکل ۳-۲۸ نتایج خستگی با بارگذاری معکوس شونده برای آلیاژ آلومینیوم 7075

۱۰۳..... T6 برای حالت ساچمه کوبی شده و نشده

شکل ۳-۲۹ تاثیر ساچمه کوبی بر 1-1-8 Ti در حالت LCF

۱۰۴..... شکل ۳-۳۰ ساچمه‌های چدنی، فولادی و فولاد ضد زنگ

شکل ۳-۳۱ ساچمه‌های تولید شده در طی فرآیند Cut-wire و مراحل کروی

۱۰۶..... سازی

۱۰۷..... شکل ۳-۳۱ ساچمه‌های شیشه‌ای و سرامیکی

۱۰۸..... شکل ۳-۳۲ ساچمه‌های قابل قبول و غیر قابل قبول

شکل ۳-۳۵ چرخش شاتیک از عملکرد دستگاه‌های Wheel Blast Shot

۱۱۰..... Peening

شکل ۳-۳۶ نمونه شماتیک از عملکرد دستگاه Air Blast Shot Peening

شکل ۳-۳۷ شکل شماتیکی از عمر هر یک نمونه دستگاه Air Blast Shot

۱۱۱..... Peening

شکل ۳-۳۸ شماتیکی از سطح مقطع جوش ساچمه‌ها پس از خروج از دهانه تفنگ

۱۱۲..... پاشش

شکل ۳-۳۹ چگالی نسبی تعداد برخورد ساچمه‌ها با سطح صاف قطعه کار

۱۱۳..... شکل ۳-۴۰ مسیر حرکت جریان ساچمه

۱۱۴..... شکل ۳-۴۱ ساچمه‌زنی یک شفت ساده

شکل ۳-۴۲ شماتیکی از زیرمجموعه‌های اصلی دستگاه‌های Air Blast Shot

۱۱۵..... Peening

شکل ۳-۴۳ نمونه‌ای از دستگاه‌های نسل جدید ساچمه‌زنی با سیستم کنترل تمام

کامپیوتری (CNC) - مدل RPB4848، ساخت کمپانی Progressive Surface™

۱۱۷.....

شکل ۳-۴۴ عمر خستگی نمونه‌های ShotPeen و Re-Shot Peen شده در

۱۱۸..... (a - دمای اتاق b) دمای 150 درجه سانتیگراد

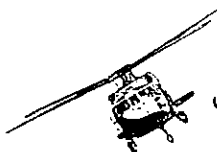
۱۱۹..... شکل ۳-۴۵ تحلیل پروفیل تنش پسماند در ماکزیمم تنش 240Mpa

۱۱۹..... شکل ۳-۴۶ تحلیل پروفیل تنش پسماند در ماکزیمم تنش 270Mpa

شکل ۳-۴۷ اثر دمای بالای کاری بر کاهش عمر خستگی مورد نظر در دو قطعه



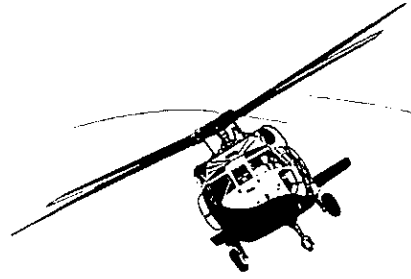
- ۱۲۰..... تیتانیومی و آلیاژ نیکل
- شکل ۳-۴۸ اثر خزش بر کاهش تنش های پسماند فشاری ناشی از فرآیند ساچمه زنی
- ۱۲۰.....
- ۱۲۲..... Shot Peen Forming Process ۴۹-۳ شکل
- ۱۲۴..... شکل ۳-۵۰ عمق تاثیر عملیات های سطحی مختلف
- شکل ۳-۵۱ زبری سطحی RZ عملیات های سطحی مکانیکی مختلف اعمال شده بر
- ۱۲۵..... AISI 304
- شکل ۳-۵۲ مقایسه عمر خستگی نمونه دست نخورده، نمونه غلطک زنی عمیق شده
- و نمونه شوک لیزری شده در سه دمای تست 25، 250 و 450 درجه سانتیگراد برای
- نمونه های راجی آلیاژ Ti-6Al-4V
- ۱۲۵.....
- شکل ۳-۵۳ تغییر نیروی غلطک زنی بر پروفیل تنش پسماند
- شکل ۳-۵۴ تاثیر افزایش نیروی غلطک زنی بر عمق منطقه دارای تنش پسماند
- فشاری در آلیاژ (Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Nb)
- ۱۲۷.....
- شکل ۳-۵۵ اثر افزایش نیروی غلطک زنی بر عمر خستگی سه نمونه Al 2024 با
- شرایط سطحی متفاوت
- ۱۲۸.....
- شکل ۳-۵۶ تاثیر افزایش نیروی غلطک زنی بر پروفیل عمقی سختی
- شکل ۳-۵۷ رفتار خستگی خوردگی ماده اصلی (AISI 450 Stainless Steel)
- و ماده تحت غلطک زنی عمیق (قرآینه LPB) تحت شرایط خوردگی
- محلول نمک اسیدی با / بدون آسیب ناشی از جرم خارجی
- ۱۳۰.....
- شکل ۳-۵۸ شماتیکی از غلطک استفاده شده در شبیه سازی
- شکل ۳-۵۹ شماتیکی از وضعیت نسبی قطعه کار و ابزار در حین انجام فرآیند
- ۱۳۲.....
- شکل ۳-۶۰ پارامترهای موثر در فرآیند غلطک زنی عمیق
- ۱۳۳.....
- شکل ۳-۶۱ قطعه کار شبیه سازی شده - قبل و بعد از انجام غلطک زنی
- شکل ۳-۶۲ مقایسه تنش پسماند ایجاد شده در جهت های اصلی و در فرآیند
- ۱۳۴..... غلطک زنی شبیه سازی شده
- شکل ۳-۶۳ اثر افزایش ارتفاع خروجی انحناء غلطک (h) بر تنش پسماند فشاری
- ۱۳۵..... سطحی
- شکل ۳-۶۴ اثر افزایش شعاع مقطع عرضی غلطک (r) بر تنش پسماند فشاری
- ۱۳۵..... سطحی
- شکل ۳-۶۵ پروفیل های تنش پسماند ایجاد شده در پنج ستون المانی مختلف در



- صفحه وسط قطعه با $\Delta Y = 0.125 \text{ mm}$ ۱۳۶
- شکل ۳-۶۶ پروفیل‌های تنش پسماند ایجاد شده در پنج ستون المانی مختلف در صفحه وسط قطعه با $\Delta Y = 0.125 \text{ mm}$ ۱۳۶
- شکل ۳-۶۷ تنش‌های پسماند فشاری موجود در المان‌های بالاترین ردیف مقطع انتخابی در جابه‌جایی‌های عرضی متفاوت ۱۳۷
- شکل ۳-۶۸ تغییرات تنش پسماند فشاری سطحی ایجاد شده بر حسب تغییر عمق غلطک‌زنی در پنج ستون انتخابی ۱۳۷
- شکل ۳-۶۹ غلطک‌زنی یک میله (بخشی از یک پروتز) ۱۳۸
- شکل ۳-۷۰ وقوع Residual Stress Relaxation در نمونه غلطک‌زنی شده با بارگذاری خمشی در وسط 460 Mpa در دماهای کاری متفاوت ۱۴۱
- شکل ۳-۷۱ غلطک‌زنی عمیق فلانچ چرخ ۱۴۲
- شکل ۳-۷۲ یک نمونه استخوان غلطک‌زنی عمیق جهت تیغه فن‌ها و کمپرسورها [23] ۱۴۳
- شکل ۳-۷۳ یک نمونه دستگاه نورد موضعی ساچمه‌ای با قابلیت اتصال به دستگاه‌های استاندارد و اتوماتیک ماشین‌کاری نظیر دستگاه‌های CNC ۱۴۴
- شکل ۳-۷۴ افزایش عمر خستگی ناشی از تغییرات‌های سطحی متفاوت اعمال شده بر نمونه فولاد AISI 304 ۱۴۵
- شکل ۳-۷۵ شماتیکی از دستگاه نگهدارنده ساچمه در روش نورد سرد موضعی (CDCR) ۱۴۶
- شکل ۳-۷۶ یک نمونه آزمایشگاهی دستگاه نورد سرد موضعی با نوسانات فراصوتی (UDCR) ۱۴۸
- شکل ۳-۷۷ شماتیکی از تجهیزات به کار رفته در دستگاه CDCR برای ایجاد ارتباط بین آن‌ها ۱۴۸
- شکل ۳-۷۸ پروفیل تنش پسماند در دو جهت طولی و عرضی برای نمونه‌های غلطک‌زنی شده به وسیله دو روش CDCR و UDCR در دو فشار متفاوت 600 bar و 400 Psi ۱۴۹
- شکل ۳-۹۰ Laser Shock Peening on TurboJet Engine Blades ۱۴۹
- شکل ۳-۸۰ شماتیکی از فرآیند شوک لیزری ۱۵۱
- شکل ۳-۸۱ شماتیکی از فرآیند شوک لیزری در حضور لایه شفاف آب و پوشش جاذب رنگ سیاه ۱۵۲



- شکل ۳-۸۲ شماتیکی از روش های کنترل و انتقال شوک لیزری ۱۵۳
- شکل ۳-۸۳ شماتیکی از فرآیند شوک لیزری دو طرفه ۱۵۳
- شکل ۳-۸۴ مقایسه پروفیل تنش پسماند فشاری ایجاد شده توسط یک پالس اشعه لیزری و دوپالس پیاپی در آلیاژ Ti-6Al-4V به وسیله پالس لیزری با چگالی انرژی 200J/cm^2 و مدت زمان پالس 30ns ۱۵۴
- شکل ۳-۸۵ نحوه برهمپوشانی پالس های لیزری در لبه Torbo Engine Blades ۱۵۵
- شکل ۳-۸۶ کاهش زاویه برخورد پالس لیزری ۱۵۶
- شکل ۳-۸۷ نمودارهای عمر خستگی نمونه های دست نخورده، ساجمه زنی شده و تحت فرآیند ساجمه زنی قرار گرفته از جنس آلیاژ آلومینیومی 7075-T7351 ۱۵۶
- شکل ۳-۸۸ Laser Beam Spot Size بر پروفیل تنش پسماند ایجاد شده ۱۵۷
- شکل ۳-۸۹ شماتیکی از نازل قطرات آب ۱۵۸
- شکل ۳-۹۰ شماتیکی از ورود قطره آب پر سرعت با سطح قطعه و پروفیل فشاری ایجاد شده ۱۵۹
- شکل ۳-۹۱ شکل شماتیکی از مجموعه دستگاه های فرآیند کوبش جت آب ۱۶۰
- شکل ۳-۹۲ شماتیکی از جت روغن پالس شده از شیپوره ۱۶۱
- شکل ۴-۱ عمق نفوذ تکنیک های مختلف اندازه گیری تنش پسماند ۱۶۴
- شکل ۴-۲ ترکیب بندی و هندسه های معمول کرنش سنج ها (Rosette) ۱۶۷



فهرست جداول

جدول ۱-۳ تا	یافته‌های ناشی از عملیات‌های سطحی مکانیکی بر ترک‌های	۴۲
سطحی		
جدول ۲-۳ لیست	استانداردهای وجود در زمینه ساچمه‌کوبی (مرتب شده بر اساس	۴۸
سال انتشار)		
جدول ۳-۳ مقایسه	استانداردهای ماشین‌های نوار آلمانی A	۸۳
جدول ۴-۳ لیست	هواپیماهایی که از پروانه Shot Peen Forming جهت فرم‌دهی	
پوسته بال‌های آنها استفاده شده است		۱۲۱