

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ه	فهرست علایم و نشانه‌ها
و	فهرست جدول‌ها
ح	فهرست شکل‌ها
۱	فصل ۱- تاریخچه و اهمیت آزمون ضربه
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- تاریخچه توسعه آزمون ضربه
۲	۱-۲-۱- آزمون ضربه از ۱۸۲۴ تا ۱۸۹۵
۳	۲-۲-۱- آزمون ضربه از ۱۸۹۵ تا ۱۹۲۲
۶	۳-۲-۱- آزمون ضربه از ۱۹۲۲ تا ۱۹۳۳: آغاز استاندارد ASTM E23
۷	۴-۲-۱- آزمون ضربه از ۱۹۳۴ تا ۱۹۴۰
۷	۵-۲-۱- آزمون ضربه از ۱۹۴۰ تا ۱۹۴۸
۸	۶-۲-۱- آزمون ضربه از ۱۹۴۸ تا حال
۱۲	۳-۱- کاربردهای رایج آزمون ضربه
۱۲	۱-۳-۱- صنایع هسته‌ای
۱۳	۲-۳-۱- صنایع فولاد
۱۴	۴-۱- پیشینه کاربرد آزمون ضربه در لوله‌های انتقال
۱۵	۵-۱- مشخصات شکست ترد و نرم در لوله‌ها
۱۶	۱-۵-۱- مشخصات شکست ترد
۱۶	۲-۵-۱- مشخصات شکست نرم
۱۶	۳-۵-۱- سطح شکست برشی در آزمون ضربه
۱۸	۶-۱- پیشینه آزمون ضربه در استاندارد API
۲۰	فصل ۲- فرایند انجام آزمون ضربه شاریبی
۲۱	۱-۲- مقدمه
۲۱	۲-۲- مشخصات نمونه‌های آزمون
۲۱	۱-۲-۲- جهت نمونه و جهت شیار
۲۳	۲-۲-۲- نوع و اندازه نمونه‌ها
۲۴	۳-۲-۲- مشخصات شیار
۲۴	۴-۲-۲- ماشین‌کاری نمونه‌ها
۲۵	۵-۲-۲- علامت‌گذاری نمونه‌ها
۲۵	۳-۲-۲- مشخصات ماشین ضربه

۲۵	نمایشگر ماشین ضربه و اتلافات.....	۱-۳-۲
۲۶	مشخصات پاندول، ضربه زن و سندان‌ها.....	۲-۳-۲
۲۷	فرایند آزمون.....	۴-۲
۲۷	کنترل ماشین ضربه و آماده‌سازی تجهیزات.....	۱-۴-۲
۲۹	کنترل دمای نمونه در آزمون.....	۲-۴-۲
۲۹	انجام آزمون.....	۳-۴-۲
۳۰	اطلاعات قابل حصول از آزمون ضربه.....	۵-۲
۳۰	انرژی شکست نمونه.....	۱-۵-۲
۳۰	اندازه‌گیری انبساط جانبی نمونه.....	۲-۵-۲
۳۲	درصد شکست برشی.....	۳-۵-۲
۳۵	دقت و انحراف نتایج.....	۶-۲

فصل ۳- آشنایی با فولادهای API..... ۳۶

۳۷	مقدمه	۱-۳
۳۷	فولاد	۲-۳
۳۸	توسعه فولادهای مورد استفاده در خطوط انتقال گاز.....	۱-۲-۳
۳۸	مشخصات فولادها در استاندارد API.....	۲-۲-۳
۳۹	خواص فولاد API X70.....	۳-۳
۳۹	ترکیب شیمیایی.....	۱-۳-۳
۴۰	کربن معادل.....	۲-۳-۳
۴۱	خواص مکانیکی فولاد API X70.....	۳-۳-۳
۴۲	به‌کارگیری نورد کنترل شده در ساخت فولادهای انتقال گاز.....	۴-۳
۴۴	فرایند ساخت لوله‌های مارپیچ.....	۵-۳
۴۷	مراحل تولید لوله مارپیچ در شرکت لوله و تجهیزات سدید.....	۱-۵-۳

فصل ۴- بررسی پژوهش‌های اخیر مرتبط با آزمون ضربه شاری روی فولادهای API..... ۴۸

۴۹	مقدمه	۱-۴
۴۹	آزمون ضربه شاری و کنترل رشد ترک نرم.....	۲-۴
۴۹	سال ۲۰۰۶.....	۱-۲-۴
۵۱	سال ۲۰۰۷.....	۲-۲-۴
۵۳	سال ۲۰۰۸.....	۳-۲-۴
۵۵	سال ۲۰۰۹.....	۴-۲-۴
۵۶	آزمون ضربه شاری و ریزساختار فولادهای API.....	۳-۴
۵۷	سال ۲۰۰۷.....	۱-۳-۴
۵۸	سال ۲۰۰۹.....	۲-۳-۴
۵۹	سال ۲۰۱۱.....	۳-۳-۴
۶۱	آزمون ضربه شاری و پدیده جدایش در مقطع نمونه‌ها.....	۴-۴

۶۳	سایر پژوهش‌های مرتبط با آزمون ضربه شاریپی	۵-۴
۶۴	تهیه نمونه‌ها و انجام آزمون ضربه	فصل ۵
۶۵	مقدمه	۱-۵
۶۵	مشخصات لوله	۲-۵
۶۶	فرایند ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی	۳-۵
۶۶	برش لوله	۱-۳-۵
۶۷	ماشین‌کاری قطعات بریده شده برای ساخت نمونه‌های آزمون ضربه شاریپی	۲-۳-۵
۶۷	شیار زنی نمونه‌ها	۳-۳-۵
۶۸	علامت‌گذاری نمونه‌ها	۴-۳-۵
۶۹	کنترل اندازه نمونه‌ها	۵-۳-۵
۷۱	فرایند انجام آزمون ضربه شاریپی	۴-۵
۷۲	قرار دادن نمونه در داخل محفظه سرد کننده	۱-۴-۵
۷۴	انجام آزمون	۲-۴-۵
۷۵	نتایج	فصل ۶
۷۶	انرژی شکست نمونه‌ها	۱-۱-۶
۸۴	اندازه‌گیری انبساط جانبی نمونه‌ها	۲-۱-۶
۸۷	تخمین درصد سطح شکست برشی	۳-۱-۶
۹۰	برازش منحنی انتقال بر مقادیر انرژی، کرنش جانبی و سطح شکست برشی	۲-۶
۹۱	منحنی انتقال برای انرژی شکست	۱-۲-۶
۹۲	منحنی انتقال برای انبساط جانبی	۲-۲-۶
۹۳	منحنی انتقال برای درصد سطح شکست برشی	۳-۲-۶
۹۵	تحلیل آماری نتایج در دماهای کاملاً ترد و دمای انتقال	فصل ۷
۹۶	مقدمه	۱-۷
۹۶	توزیع وایبول	۲-۷
۹۸	تحلیل انرژی‌های شکست در دمای انتقال با استفاده از مدل وایبول	۳-۷
۱۰۱	تحلیل انرژی‌های شکست در دمای ۱۹۰- درجه سانتیگراد با استفاده از مدل وایبول	۴-۷
۱۰۲	مقایسه پارامترها در دمای انتقال و دمای رفتار کاملاً ترد	۵-۷
۱۰۳	نتیجه‌گیری و پیشنهادات	فصل ۸
۱۰۴	مقدمه	۱-۸
۱۰۴	نتیجه‌گیری	۲-۸
۱۰۴	انرژی شکست	۱-۲-۸
۱۰۵	انبساط جانبی	۲-۲-۸
۱۰۵	درصد سطح شکست برشی	۳-۲-۸
۱۰۶	تحلیل آماری نتایج انرژی شکست	۴-۲-۸

۱۰۶.....	۳-۸ - پیشنهادات.....
۱۰۸.....	ضمیمه الف - توصیف طراحی و ساخت محفظه دمای پایین با مبرد نیتروژن مایع.....
۱۱۰.....	۱- مقدمه و بیان مسئله.....
۱۱۰.....	۲- روش‌های ایجاد شرایط دمایی بسیار پایین.....
۱۱۲.....	۳- طراحی و ساخت محفظه دمای پایین قابل حمل.....
۱۱۳.....	۳-۱- تهیه محفظه اولیه.....
۱۱۴.....	۳-۲- انتخاب ماده عایق و تقویت عایق‌بندی محفظه.....
۱۱۴.....	۳-۳- تهیه و ساخت محل قرارگیری نیتروژن مایع.....
۱۱۵.....	۳-۴- ساخت صفحه جدا کننده و نصب تجهیزات.....
۱۱۶.....	۳-۵- دماسنج محفظه.....
۱۱۷.....	۴- آزمون کارایی محفظه با نیتروژن مایع و اعمال اصلاحات.....
۱۱۷.....	۵- مزایای محفظه حاضر.....
۱۱۷.....	۶- برخی از کاربردهای محفظه دماهای بسیار پایین.....
۱۱۸.....	ضمیمه ب - شکست‌نگاری مقطع شکست نمونه‌ها.....
۱۱۹.....	۱- مقدمه.....
۱۱۹.....	۲- شکست نرم.....
۱۲۱.....	۳- شکست ترد.....
۱۲۲.....	۴- آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام شکست‌نگاری.....
۱۲۵.....	۵- نتایج و تصاویر شکست‌نگاری نمونه‌ها.....
۱۳۷.....	مراجع.....

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
انرژی شکست شاری	CVN (J)
مدول یانگ	E (GPa)
ضریب رابطه توانی تنش پلاستیک	K (MPa)
توان کرنش پلاستیک در رابطه تنش پلاستیک	n
تنش تسلیم	Ys (MPa)
استحکام کششی	Ts (MPa)
کربن معادل	CE
نسبت تنش تسلیم به تنش نهایی	Y/T
درجه سانتیگراد	°C
توان رابطه توزیع وایبول	m
احتمال خرابی	P _f

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۱۹	جدول ۱-۱: توسعه الزامات مربوط به چقرمگی در استاندارد API 5L
۲۵	جدول ۱-۲: اندازه و مشخصات نمونه استاندارد (Type A) آزمون شارپی
۳۳	جدول ۲-۲: تعیین درصد شکست برشی بر اساس اندازه سطح شکست مسطح نمونه ..
۳۵	جدول ۳-۲: مقادیر تکرارپذیری و تکثیرپذیری اندازه‌گیری نتایج ..
۳۹	جدول ۱-۳: مشخصات دو سطح مشخصه محصول در استاندارد API
۴۰	جدول ۲-۳: ترکیب شیمیایی فولاد API X70 ..
۴۱	جدول ۳-۳: خواص کششی الزامی استاندارد گریدهای مختلف فولادهای API
۴۲	جدول ۴-۳: انرژی ضربه شارپی الزامی استاندارد گریدهای مختلف فولادهای API
۴۲	جدول ۵-۳: خواص کششی بدست آمده برای فولاد API X70 در جهات مختلف لوله
۵۰	جدول ۱-۴: مقادیر سطح بالای انرژی، دمای انتقال و دمای انرژی ۲۸ ژول برای دو فولاد S و T
۵۳	جدول ۲-۴: انرژی شکست شارپی برای فولاد پایه، فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت در فولاد X70
۵۴	جدول ۳-۴: تغییرات زمان (t)، نیرو (f)، جابجایی چکش (s)، سرعت چکش (v) و انرژی (E) در مدت آزمون ..
۵۶	جدول ۴-۴: مقادیر جابجایی چکش، نیرو و انرژی در زمان‌های تسلیم، بیشینه و پایان آزمون ..
۵۷	جدول ۵-۴: انرژی شکست در دماهای بالا و دمای انتقال فولادهای X70 (A و B) و X80 (C) ..
۵۸	جدول ۶-۴: انرژی شکست، انرژی دماهای بالا و دمای انتقال برای فولادهای X70 (فولاد A) و X90 (فولاد B) ..
۶۳	جدول ۷-۴: مقادیر انرژی شکست در فولاد پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش فولاد X65
۶۵	جدول ۱-۵: مشخصات لوله API X70 تولید شده در شرکت لوله و تجهیزات سدید
۷۰	جدول ۲-۵: اندازه‌های بدست آمده برای برخی از نمونه‌ها پیش از انجام آزمون
۷۱	جدول ۳-۵: مشخصات تفصیلی ماشین ضربه Zwick-Roell
۷۶	جدول ۱-۶: مقادیر انرژی شکست نمونه‌ها در دماهای مختلف
۸۰	جدول ۲-۶: نتایج کلی حاصل از مقادیر انرژی شکست
۸۶	جدول ۳-۶: مقادیر انبساط جانبی نمونه‌ها
۸۹	جدول ۴-۶: مقادیر درصد سطح شکست برشی
۹۱	جدول ۵-۶: مقادیر پیشنهاد شده برای پارامترهای روابط (۱-۶) و (۲-۶) ..
۹۱	جدول ۶-۶: مقادیر پارامترها در برازش منحنی انتقال انرژی
۹۲	جدول ۷-۶: مقادیر پارامترها در برازش منحنی انتقال انبساط جانبی
۹۳	جدول ۸-۶: مقادیر پارامترها در برازش منحنی انتقال درصد سطح شکست برشی
۹۹	جدول ۱-۷: مقادیر انرژی شکست و احتمال خرابی در دمای انتقال (۷۵- درجه سانتیگراد)

- جدول ۷-۲: مقادیر پارامترهای مدل وایبول برای دمای انتقال ۱۰۰
- جدول ۷-۳: مقادیر انرژی شکست و احتمال خرابی در دمای ۱۹۰- درجه سانتیگراد ۱۰۱
- جدول ۷-۴: مقادیر پارامترهای مدل وایبول برای دمای ۱۹۰- درجه سانتیگراد ۱۰۱
- جدول ۷-۵: مقایسه مقادیر پارامترهای مدل وایبول در دمای انتقال و دمای رفتار کاملاً ترد ۱۰۲
- جدول ۸-۱: مقایسه نتایج حاصل از مقادیر انرژی شکست با نتایج تحقیقات مشابه ۱۰۴
- جدول ۸-۲: مقایسه دمای انتقال برای سطح شکست برشی با نتایج تحقیقات مشابه ۱۰۵
- جدول الف-۱: رسانایی حرارتی تعدادی از عایق‌های حرارتی ۱۱۴
- جدول ب-۱: مشخصات نمونه‌های انتخاب شده جهت شکست‌نگاری ۱۲۳

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: مشخصات ماشین وزنه سقوط کننده جهت آزمون محور قطار در سال ۱۹۰۰.....	۴
شکل ۲-۱: مقادیر انرژی و انحراف نتایج اولین آزمون‌های با استفاده از ماشین‌های صنعتی.....	۹
شکل ۳-۱: مقادیر انرژی و انحراف نتایج مراحل دوم و سوم آزمون‌های با استفاده از ماشین‌های صنعتی.....	۹
شکل ۴-۱: توزیع تطابق مقادیر انرژی برای سطوح پایین انرژی شکست.....	۱۰
شکل ۵-۱: توزیع تطابق مقادیر انرژی برای سطوح بالای انرژی شکست.....	۱۱
شکل ۶-۱: توزیع تطابق مقادیر انرژی برای سطوح بسیار بالای انرژی شکست.....	۱۱
شکل ۷-۱: منحنی‌های انتقال قبل و بعد از تماس با تشعشع نوترونی برای یک فولاد صنایع هسته‌ای.....	۱۳
شکل ۸-۱: شکست گسترده در دو نوع الف) ترد و ب) نرم.....	۱۶
شکل ۹-۱: مقایسه منحنی انتقال برای آزمون در اندازه واقعی و آزمون‌های ضربه سقوطی و ضربه شاریبی.....	۱۷
شکل ۱۰-۱: توزیع سرعت شکست نسبت به ظاهر سطح شکست برای لوله از جنس فولاد X52.....	۱۷
شکل ۱۱-۱: تعیین دمای انتقال براساس الف) شکست برشی در آزمون ضربه سقوطی، ب) شکست برشی در آزمون ضربه شاریبی، ج) انرژی شکست ضربه شاریبی.....	۱۷
شکل ۱-۲: جهت‌های اصلی استخراج نمونه و عنوان اختصاری هر جهت برای ماده اولیه با مقطع مستطیلی.....	۲۲
شکل ۲-۲: جهت‌های اصلی استخراج نمونه و عنوان اختصاری هر جهت برای ماده اولیه با مقطع گرد.....	۲۲
شکل ۳-۲: جهت‌های غیر اصلی استخراج نمونه و عنوان اختصاری هر جهت.....	۲۲
شکل ۴-۲: اندازه استاندارد متداول نمونه آزمون شاریبی.....	۲۳
شکل ۵-۲: نمونه‌های پیشنهاد شده با مقطع کوچک‌تر از استاندارد برای آزمون شاریبی.....	۲۳
شکل ۶-۲: انواع شیارهای استاندارد نمونه آزمون شاریبی.....	۲۴
شکل ۷-۲: دو نوع پاندول استاندارد طراحی شده جهت ماشین آزمون شاریبی.....	۲۶
شکل ۸-۲: مشخصات سندان و ضربه‌زن ماشین شاریبی.....	۲۷
شکل ۹-۲: انبر استاندارد برای حمل و قرار دادن نمونه بر روی ماشین آزمون شاریبی.....	۲۸
شکل ۱۰-۲: تصویر شماتیک راهنمای اندازه‌گیری انبساط جانبی نمونه.....	۳۱
شکل ۱۱-۲: ساعت اندازه‌گیری و قید و بند ویژه جهت سهولت اندازه‌گیری انبساط جانبی نمونه.....	۳۱
شکل ۱۲-۲: نواحی سطح شکست نمونه جهت تعیین درصد شکست برشی.....	۳۳
شکل ۱۳-۲: الگوهای مقایسه سطح شکست نمونه جهت تعیین درصد شکست برشی.....	۳۴
شکل ۱-۳: روند توسعه فولادهای لوله با استحکام بالا.....	۳۸
شکل ۲-۳: نمودار دما - زمان برای عملیات ترمومکانیکال.....	۴۴
شکل ۳-۳: نمای شماتیک فرم دهی و تولید لوله به روش درزجوش مارپیچ.....	۴۵

- شکل ۳-۴: جوش کاری داخلی لوله با سه الکتروود به روش زیرپودری ۴۶
- شکل ۳-۵: عملکرد الکتروودها در جوشکاری داخلی و خارجی (به ترتیب توسط سه و دو الکتروود) ۴۶
- شکل ۳-۶: تصویر شماتیک فرایند تولید لوله با درز جوش مارپیچ در شرکت لوله و تجهیزات سدید ۴۷
- شکل ۴-۱: منحنی انتقال برای فولاد X70 با فرایند نورد تشکیل تک فازهای آستنیت ۴۹
- شکل ۴-۲: منحنی انتقال برای فولاد APIX70 با فرایند نورد تشکیل دوفازی‌های آستنیت-فريت ۵۰
- شکل ۴-۳: منحنی انتقال برای سه موقعیت فلز جوش در فولاد API2W GR.50 ۵۱
- شکل ۴-۴: منحنی انتقال برای نوعی فولاد X65 با جهت شیار طولی نمونه ۵۲
- شکل ۴-۵: منحنی انتقال برای نوعی فولاد X65 با جهت شیار جانبی نمونه ۵۲
- شکل ۴-۶: تغییرات نیرو نسبت به جابجایی چکش در مدت آزمون ضربه فولاد X70 ۵۳
- شکل ۴-۷: تغییرات انرژی نسبت به جابجایی چکش در مدت آزمون ضربه فولاد X70 ۵۴
- شکل ۴-۸: مقادیر انرژی شکست شاری برای فولاد پایه، فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت در فولاد X65 ۵۵
- شکل ۴-۹: تغییرات نیرو نسبت به جابجایی چکش در مدت آزمون ضربه فولاد X65 ۵۵
- شکل ۴-۱۰: تغییرات انرژی نسبت به جابجایی چکش در مدت آزمون ضربه فولاد X65 ۵۶
- شکل ۴-۱۱: منحنی‌های انتقال در دو فولاد X70 (A و B) و یک فولاد X80 (C) ۵۷
- شکل ۴-۱۲: منحنی انتقال فولاد X70 (فولاد A) با استفاده از نمونه‌های نصف اندازه استاندارد (۵×۱۰×۵۵ میلیمتری) ۵۸
- شکل ۴-۱۳: منحنی انتقال برای فولاد X90 (فولاد B) با استفاده از نمونه‌های نصف اندازه استاندارد (۵×۱۰×۵۵ میلیمتری) ۵۹
- شکل ۴-۱۴: نتایج آزمون‌های ضربه شاری برای دو نوع فولاد APIX80 (فولاد پایه) ۶۰
- شکل ۴-۱۵: نتایج آزمون‌های ضربه شاری برای دو فولاد APIX80 در ناحیه متأثر از حرارت ۶۰
- شکل ۴-۱۶: تصاویر سطح شکست نمونه‌های آزمون شاری فولاد APIX80 در مقیاس ماکرو و میکرو ۶۱
- شکل ۴-۱۷: منحنی‌های انتقال در فولاد APIX80 در نمونه‌های با جهت شیار اصلی ۶۲
- شکل ۴-۱۸: منحنی‌های انتقال در فولاد APIX80 در نمونه‌های با جهت شیار غیر اصلی ۶۲
- شکل ۵-۱: تصویر قطعه ای از لوله API X70 تولید شده در شرکت لوله و تجهیزات سدید ۶۵
- شکل ۵-۲: موقعیت استخراج نمونه‌ها از لوله بر اساس استاندارد API ۶۶
- شکل ۵-۳: استخراج قطعه اولیه با استفاده از هوا برش ۶۶
- شکل ۵-۴: اره لنگ نواری مورد استفاده جهت برش قطعه اولیه ۶۷
- شکل ۵-۵: دستگاه ویژه شیارزن شاری و مراحل شیارزنی نمونه‌ها ۶۸
- شکل ۵-۶: نمونه‌های آزمون شاری پس از علامت‌گذاری ۶۸
- شکل ۵-۷: ساعت اندازه‌گیری و قید و بند ویژه جهت اندازه‌گیری ضخامت بدون ترک نمونه ۶۹
- شکل ۵-۸: ماشین ضربه Zwick-Roell با ظرفیت ۷۵۰ ژول ۷۱
- شکل ۵-۹: قرارگیری نمونه‌ها در محیط سرد با واسط مایع (الکل) ۷۲
- شکل ۵-۱۰: محفظه دمای پایین طراحی و ساخته شده جهت پروژه ۷۳

- شکل ۵-۱۱: طرح نگهدارنده نمونه‌ها از جنس ورق گالوانیزه پیش از مراحل خم‌کاری و لحیم‌کاری ۷۳
- شکل ۵-۱۲: نگهدارنده نمونه‌ها پس از تکمیل مراحل ساخت ۷۴
- شکل ۶-۱: مقادیر انرژی شکست نمونه‌ها نسبت به دما ۷۹
- شکل ۶-۲: تصویر نمونه‌های آزمایش شده تا دمای ۷۰- درجه سانتیگراد ۸۱
- شکل ۶-۳: تصویر نمونه‌های آزمایش شده در دمای ۷۵- درجه سانتیگراد ۸۲
- شکل ۶-۴: تصویر نمونه‌های آزمایش شده از دمای ۸۰- تا ۱۲۰- درجه سانتیگراد ۸۳
- شکل ۶-۵: تصویر نمونه‌های آزمایش شده در دمای ۱۹۰- درجه سانتیگراد ۸۴
- شکل ۶-۶: تصاویر ماکروگراف سطح شکست تعدادی از نمونه‌ها پس از جداسازی ۸۵
- شکل ۶-۷: تغییرات مقادیر انبساط جانبی نسبت به دما ۸۷
- شکل ۶-۸: الگوی ظاهر سطح شکست ترد نمونه آزمون شده در دمای ۱۹۰- درجه سانتیگراد ۸۸
- شکل ۶-۹: تغییرات مقادیر درصد سطح شکست برشی نسبت به دما ۹۰
- شکل ۶-۱۰: منحنی انتقال برای مقادیر انرژی شکست نمونه‌ها ۹۲
- شکل ۶-۱۱: منحنی انتقال برای مقادیر انبساط جانبی نمونه‌ها ۹۳
- شکل ۶-۱۲: منحنی انتقال برای مقادیر درصد سطح شکست برشی نمونه‌ها ۹۴
- شکل ۷-۱: توابع توزیع وایبول با پارامترهای مختلف ۹۶
- شکل ۷-۲: مقادیر احتمال تجمعی شکست و منحنی توزیع احتمال وایبول در دمای انتقال ۱۰۰
- شکل ۷-۳: مقادیر احتمال تجمعی شکست و منحنی توزیع احتمال وایبول برای دمای ۱۹۰- درجه سانتیگراد ۱۰۲
- شکل الف-۱: محفظه دمای پایین با کنترل کننده دمای الکتریکی قابل تنظیم ۱۱۰
- شکل الف-۲: تزریق مستقیم بخار نیتروژن جهت سرمایه‌گذاری فضای کوچک قرارگیری نمونه‌ها ۱۱۱
- شکل الف-۳: تغییرات دمای نمونه نسبت به زمان در تزریق مستقیم بخار نیتروژن بر روی نمونه ۱۱۱
- شکل الف-۴: طرح شماتیک اولیه محفظه در نرم افزار CATIA ۱۱۲
- شکل الف-۵: محفظه پایه اولیه ۱۱۳
- شکل الف-۶: تغییرات و تقویت عایق‌بندی محفظه پایه ۱۱۳
- شکل الف-۷: محل قرارگیری نیتروژن مایع در کف محفظه ۱۱۴
- شکل الف-۸: صفحه جدا کننده و مدار الکتریکی محفظه ۱۱۵
- شکل الف-۹: دماسنج و پراب‌های محفظه در زمان آزمون کارایی محفظه ۱۱۶
- شکل ب-۱: تصاویر شکست‌نگاری چند نوع شکست نرم حفره‌ای ۱۲۰
- شکل ب-۲: مدهای برشی (دوم و سوم) شکست و شکل حفره‌های حاصل ۱۲۱
- شکل ب-۳: شکست‌های کلیواژ (الف) درون دانه‌ای و (ب) بین دانه‌ای ۱۲۲
- شکل ب-۴: جداسازی سطح شکست نمونه‌ها توسط تیغه فرز (روی ماشین گردتراشی) ۱۲۳
- شکل ب-۵: مجموعه نمونه آماده شده جهت قرارگیری در زیر دستگاه SEM ۱۲۴
- شکل ب-۶: تصویر دستگاه SEM مورد استفاده ۱۲۴
- شکل ب-۷: تصویر مجموعه نمونه پیش از ورود به دستگاه SEM ۱۲۵

- شکل ب-۸: تصاویر شکست‌نگاری نمونه C. 2 آزمایش شده در دمای صفر درجه سانتیگراد ۱۲۶
- شکل ب-۹: تصاویر شکست‌نگاری نمونه E. 1 آزمایش شده در دمای ۲۰- درجه سانتیگراد ۱۲۸
- شکل ب-۱۰: تصاویر شکست‌نگاری نمونه J. 2 آزمایش شده در دمای ۷۰- درجه سانتیگراد ۱۳۰
- شکل ب-۱۱: تصاویر شکست‌نگاری نمونه K. 1 آزمایش شده در دمای ۷۵- درجه سانتیگراد ۱۳۱
- شکل ب-۱۲: تصاویر شکست‌نگاری نمونه 7. 2 آزمایش شده در دمای ۷۵- درجه سانتیگراد ۱۳۲
- شکل ب-۱۳: تصاویر شکست‌نگاری نمونه 8. 1 آزمایش شده در دمای ۷۵- درجه سانتیگراد ۱۳۳
- شکل ب-۱۴: تصاویر شکست‌نگاری نمونه U. 2 آزمایش شده در دمای ۱۲۰- درجه سانتیگراد ۱۳۵
- شکل ب-۱۵: تصاویر شکست‌نگاری نمونه 4. 2 آزمایش شده در دمای ۱۹۰- درجه سانتیگراد ۱۳۶

فصل ۱ – تاریخچه و اهمیت آزمون ضربه

۱-۱- مقدمه

آزمون ضربه شاریبی یک روش کم‌هزینه و قابل اطمینان است که در کدهای معمول به طور اجباری برای سازه‌هایی که در شرایط انتقال رفتار نرم به ترد قرار می‌گیرند (مانند پل‌ها و لوله‌ها و مخازن تحت فشار) مورد تاکید قرار گرفته است. توسعه فناوری آزمون ضربه و فرایند انجام دقیق و تکرارپذیری و کاربرد وسیع آن به عنوان یک آزمون استاندارد حدود ۶۰ سال (سال‌های ۱۹۰۰ تا ۱۹۶۰ میلادی) به طول انجامید. در این فصل تاریخچه اولیه آزمون ضربه و برخی پیشرفت‌های آن در فرایند آزمون (شکل نمونه استاندارد، شیار، ارتباط با کارایی سازه در شرایط واقعی و شناخت مجهولات) که منجر به پذیرش گسترده این روش شده است، مرور و بررسی می‌گردد.

عدم تشابه نتایج آزمون در روزها و آزمایشگاه‌های مختلف، به معنای بی‌فایده بودن آزمون است. در سال‌های طولانی محققان دریافتند، نتایج آزمون ضربه شدیداً به اندازه نمونه و هندسه شیار و از طرف دیگر به سندان و ضربه‌زننده ماشین ضربه وابسته است. در مرتبه بعد نتایج آزمون ضربه به متغیرهای دیگری مانند سرعت ضربه، اتلاف انرژی در ماشین آزمون و اصطکاک نیز وابسته می‌باشد. هدف کسانی که استاندارد ASTM E23^۱ را برای روش‌های آزمون نمونه شیاردار فلزی در طول سال‌ها تدوین نموده‌اند، استاندارد سازی و کنترل متغیرهای مؤثر در آزمون ضربه بوده است. در این بخش با نگاهی به تاریخچه آزمون ضربه، بر پیشرفت در کاربرد و درک آزمون ضربه و بازتاب آن‌ها در تکامل استاندارد آزمون تاکید خواهد گردید.

۱-۲- تاریخچه توسعه آزمون ضربه

۱-۲-۱- آزمون ضربه از ۱۸۲۴ تا ۱۸۹۵

اولین شواهدی که می‌توان برای اثر بارگذاری ضربه‌ای بر فلزات یافت به نظرات تئوریک ارائه شده توسط تردگلد^۲ در سال ۱۸۲۴ راجع به مقاومت چدن در برابر بارهای ناگهانی بر می‌گردد. در سال ۱۸۴۹ انگلستان گروهی را برای تحقیق بر کاربرد فولاد در صنایع ریلی تشکیل داد که با نگاه تجربی به آزمون ضربه آغاز به کار کرد. پس از آن محققین در زمینه شکست سازه‌ها دریافتند که اثر بارگذاری ضربه‌ای بر مواد با بارگذاری استاتیکی بسیار متفاوت است و بنابراین نتایج حاصل از آزمون کشش و بارگذاری آرام در پیش‌بینی رفتار واقعی در بارگذاری دینامیکی قابل اطمینان نیستند. در سال ۱۸۵۷ ردمن^۳ یک ماشین ضربه سقوطی را برای بررسی مشخصات فولادهای مورد استفاده در توپ و اسلحه ابداع نمود و در مدت ۳۰ سال پس از آن ماشین او برای آزمون فولادهای ریل و بررسی کیفی قطعات فولادی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت. بیشتر آزمایش‌های ضربه انجام شده، بر روی قطعات نهایی تولیدی مانند لوله‌ها و محورها انجام می‌شد و این آزمون‌ها به عنوان معیاری برای کنترل دسته‌ای از مواد، مقایسه طراحی قطعات یا مقایسه مقاومت به ضربه در شرایط سازه‌ای متفاوت مواد (مانند مقایسه چدن با فولاد نرم)

1. American Society for Testing and Materials

2. Tredgold

3. Captain Rodman

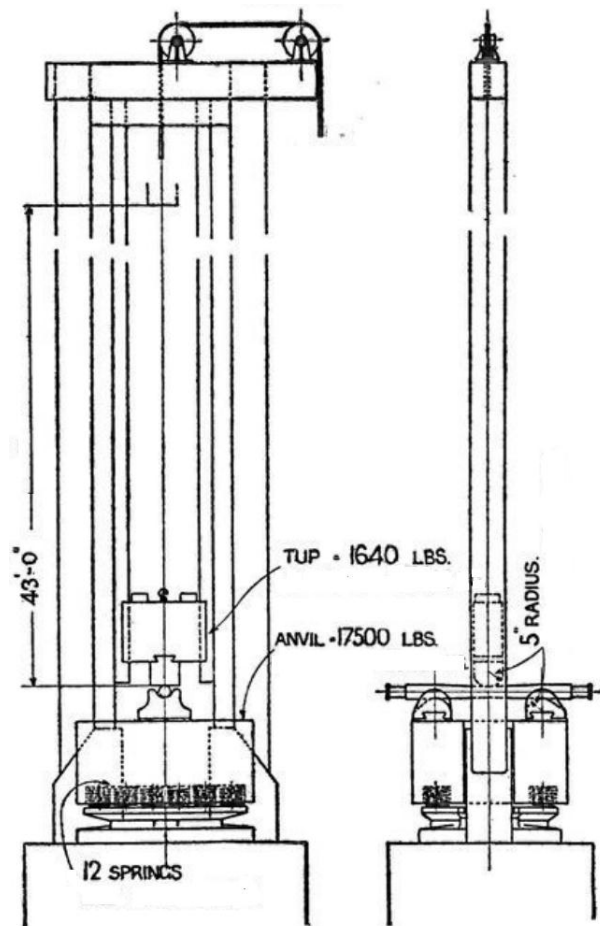
استفاده گردید. سنجش نتایج در آن زمان ضعیف و معمولاً به گزارش شکست یا عدم شکست قطعه محدود می‌شد. در این آزمون‌ها از نمونه مستطیلی بدون شیار استفاده می‌شد که تنها برای مواد ترد (که ایجاد ترک در آن‌ها به آسانی صورت می‌پذیرد) مناسب بود و نمونه‌های ساخته شده از مواد نرم اغلب تنها خم می‌شدند. لی چاتالیر^۱ در سال ۱۸۹۲ استفاده از نمونه‌های شیاردار را برای آزمون ضربه سقوطی پیشنهاد داد. او دریافت که برخی از فولادها که رفتار نرم و خمش بدون شکست در آزمون نمونه مستطیلی بدون شیار دارند، وقتی از نمونه شیاردار استفاده شود رفتاری ترد و شکننده از خود نشان می‌دهند. همزمان با اضافه شدن شیار به نمونه آزمون به عنوان یک پیشرفت مهم، لزوم کمی سازی مداوم فرایند آزمون ضربه برای سنجش مقاومت به شکست در مواد نیز احساس شد. همچنین تلاش برای توجیه و تدوین روش آزمون به گونه‌ای که بتواند مقادیر و نتایج مطمئن و پاسخگوی منتقدان این روش را ایجاد نماید، مورد نیاز بود [۱].

۱-۲-۲- آزمون ضربه از ۱۸۹۵ تا ۱۹۲۲

این دوره زمان تاسیس برخی از مراکز استاندارد ملی و بین‌المللی است که علت اصلی رشد و توسعه استانداردها برای فناوری‌های مختلف و از جمله فرایندهای آزمون مواد می‌باشد. مراکزی مانند انجمن آزمون مواد امریکا (ASTM) (تاسیس در ۱۸۹۸) و انجمن بین‌المللی آزمون مواد (IATM)^۲ (تاسیس در ۱۹۰۱) که روابط کاری متقابلی با هم داشته و به مرور زمان توسعه یافتند. در سال ۱۹۰۰ مروری بر مشخصات استاندارد، انواع نمونه و روش‌های آزمون برای آهن و فولاد در امریکا توسط IATM منتشر گردید. در میان این آزمون‌ها، آزمون ضربه سقوطی بر روی اکسل و چرخ‌های قطار و همچنین ریل‌ها مورد تاکید قرار گرفت. در این آزمون وزنه سقوط کننده ۲۰۰۰ پوند، چکش با شعاع ۵ اینچ و ارتفاع سقوط، مشخصات سندان‌ها و تعداد تکرار آزمون بر روی یک قطعه بسته به نوع قطعه تعیین و الزام عدم شکستن قطعه و محدوده تغییر شکل (خمش) مجاز در اثر آزمون، بیان شده است. مشخصات ماشین ضربه سقوطی برای آزمون محور قطار در شکل ۱-۱ قابل مشاهده است [۲].

1. Le Chatalier

2. International Association for Testing Materials



شکل ۱-۱: مشخصات ماشین وزنه سقوط کننده جهت آزمون محور قطار در سال ۱۹۰۰ [۲].

در اولین کتاب چکیده مقالات و مباحث نشست‌های ASTM و IATM تا سال ۱۹۰۱ سه مزیت برای آزمون ضربه سقوطی عنوان گردیده است: (۱) امکان آزمون قطعات بزرگ تولیدی با استفاده از تجهیزات ساده و ارزان قیمت، (۲) آسانی و سرعت در حصول نتایج و (۳) ارتباط مستقیم تاثیر آزمون بر قطعه با بسیاری از اثرات ناشی از شرایط کاری قطعه. در سال ۱۹۰۲ یعنی تنها چهار سال پس از تاسیس انجمن آزمون مواد آمریکا، "کمیته دانش‌های مرتبط با آزمون ضربه" تاریخچه‌ای از آزمون ضربه و ماشین‌های ضربه که شامل بیش از صد مقاله منتشر شده در کشورهای آمریکا، فرانسه و آلمان بود را به چاپ رساند. نیاز به سنجش کمی آزمون ضربه و طراحی مهندسی برای این منظور توسط راسل^۱ در مقاله‌ای در سال ۱۸۹۸ عنوان شده است [۳ و ۱]. او اشاره نمود که هیچ یک از ماشین‌های آن زمان مانند ماشین ضربه سقوطی بیش از اینکه نمونه شکسته می‌شود یا خیر نتیجه‌ی دیگری بدست نمی‌دهند. بنابراین او ماشین ضربه پاندولی را طراحی نمود که در آن اندازه‌گیری انرژی صرف شده برای شکستن نمونه امکان‌پذیر بود. گزارش‌های او نشان می‌دهند در مقایسه با ماشین‌های ضربه پاندولی امروزی، وی تحلیل و تخمین دقیقی از اتلافات اصطکاک، مرکز جرم و مرکز ضربه داشته است. از آنجایی که در آن زمان ماشین‌های ضربه هنوز استاندارد نشده بودند، ماشین ضربه پاندولی بسیار بزرگ و عموماً برای شکستن قطعات در اندازه

1. Russell

واقعی به کار می‌رفته است. ماشین پاندولی راسل تعیین مقدار انرژی لازم برای شکستن نمونه‌های گستره زیادی از مواد را ممکن ساخت و او به عنوان اولین فرد توسعه دهنده آزمون ضربه، پایه تحقیقات بعدی بر ماشین ضربه پاندولی را بنا نهاد [۳ و ۱].

اگرچه بسیاری از ماشین‌های این دوره در مقایسه با استانداردهای امروزی بسیار ساده بودند، اما رفتار مواد در برابر ضربه در آن زمان ناشناخته و نتایج آزمون‌ها اطلاعات جدیدی را به دست می‌داد. به نظر می‌رسد، محققان فرانسوی پیش از دیگران استاندارد سازی ساختمان کلی آزمون ضربه را آغاز نموده‌اند و بیشترین نتایج بررسی اثر پارامترهای مختلف فرایند آزمون ضربه توسط آن‌ها در مجلات انجمن بین‌المللی آزمون مواد در سال‌های ۱۹۰۱ تا ۱۹۱۲ به چاپ رسیده است. همچنین نماینده فرانسه، جرج شارپی^۱ که پس از همایش IATM در سال ۱۹۰۶ در بروکسل کرسی ریاست فعالیت‌های راجع به آزمون ضربه را بدست آورد، مباحث علمی زیادی در مورد تکرارپذیری و تطابق کافی نتایج آزمون ضربه برای طرح آن به عنوان یک فرایند آزمون استاندارد را رهبری نمود. او ایده اولیه خود را در نشریه ماه ژوئن انجمن مهندسی عمران فرانسه و در همایش IATM در بوداپست مجارستان در سال ۱۹۰۱ ارائه نمود. تلاش‌های جدی شارپی در استاندارد سازی آزمون ضربه و همچنین نقش سازنده او در کرسی ریاست انجمن بین‌المللی آزمون مواد همزمان با تحقیقات خود او باعث شد در نیمه اول قرن نوزدهم، آزمون ضربه با نام شارپی گره بخورد. تسلط و تجارب او در مراحل رشد و توسعه آزمون ضربه (توسط خود او و محققان دیگر) باعث شد او بتواند طراحی ماشین و فرایند آزمون ضربه را به گونه‌ای که مورد توافق عموم باشد، ارائه کند. در سال ۱۹۰۵ شارپی طرح ماشین خود را که به ماشین‌های آزمون امروزی بسیار شبیه بود، پیشنهاد داد و آزمون شارپی و روش شارپی در مراجع به نام وی ثبت گردید. ماشین‌ها و روش‌های استاندارد دیگری نیز در این زمان طراحی شدند و در سال ۱۹۰۷ مجمع آزمون مواد آلمان^۲ طرح توسعه یافته ارنسبرگ^۳ را مورد پذیرش قرار داد. از آنجایی که ماشین ضربه پاندولی هنوز فراگیر نشده بود، سه نوع آزمون اصلی ضربه سقوطی (فرمونت، هات-تورنر و اولسن)^۴، ضربه پاندولی (آمسler، شارپی، دوو، آیزود، اولسن و راسل)^۵ و چرخ طیار (گویلری)^۶ توسط طراحان و سازندگان پیشنهاد گردید [۴ و ۱].

در طول این دوره زمانی مشخصات و اندازه نمونه به آنچه امروزه مورد استفاده است، بسیار نزدیک شد. در همایش IATM در نیویورک در سال ۱۹۱۲ دو نوع نمونه که بیشتر متداول بود پیشنهاد شد. نمونه کوچک‌تر با اندازه ۵۳ × ۱۰ × ۱۰ میلی‌متر، شیاری به عمق ۵ و با شعاع ریشه ۰/۶ میلی‌متر و فاصله ۴۰ میلی‌متر بین سندان‌ها و نمونه بزرگ‌تر که اندازه‌های آن به نسبت نمونه کوچک‌تر، سه برابر بزرگ‌تر بودند. تجربیات راجع به اثر اندازه نشان داد که انرژی ویژه جذب شده بر واحد سطح (J/m^2) برای نمونه کوچک‌تر بیشتر است. به علت مقطع بزرگ‌تر، پراکندگی کمتر نتایج و همچنین دشواری ایجاد شیاری در نمونه کوچک، نمونه بزرگ‌تر در اوایل متداول‌تر بود، اما انجمن نهایتاً نمونه کوچک را به دلیل کوچک‌تر

1. Augustin Georges Albert Charpy
2. German Association for Testing Materials
3. Ehrensberger
4. Fremont, Hart-Turner, and Olsen
5. Amsler, Charpy, Dow, Izod, Olsen, and Russell
6. Guillery

بودن و در نتیجه کم‌هزینه‌تر بودن ماشین مورد استفاده و از طرفی کافی نبودن ضخامت بسیاری از قطعات برای استخراج نمونه بزرگ‌تر، انتخاب نمود. علاوه بر اندازه‌های نمونه، انجمن برای فرایند استاندارد آزمون پیشنهادات زیر را مطرح نمود:

- محدوده سرعت چکش
- پایه صلب برای کاهش اتلافات ارتعاشی
- کمترین نسبت جرم و صلبیت سندان نسبت به اندازه چکش
- شناسایی افزایش مجازی انرژی به هنگام تغییر شکل نمونه‌های از جنس مواد نرم در اطراف لبه‌های چکش پهن.

در جلسه انجمن در سال ۱۹۱۲ گزارشی مبنی بر تصدیق قابلیت استفاده از آزمون ضربه جهت بررسی تردی و تولید فولاد با تردی کمتر ارائه گردید. با وجود در حال مطالعه بودن آزمون شارپی، ارزش این آزمون در پیش‌بینی و کاهش خطر شکست اجزاء در شرایط کاری نمایان شده بود. در پهن^۱ در گزارشی بیان نمود که در دو کارخانه فولاد فرانسه در هر ماه ۱۰۰۰۰ آزمون ضربه انجام می‌شود. این آزمون‌ها قابلیت بررسی عوامل ایجاد کننده تردی مانند ترکیب شیمیایی (بخصوص مقادیر زیاد فسفر و گوگرد)، عیوب ریخته‌گری و عملیات حرارتی را امکان‌پذیر نموده و با اصلاح فرایند ساخت، عودت قطعات تولیدی به علت تردی که بیش از ۴۰٪ بود، به تنها ۳٪ کاهش یافته است [۴ و ۱].

۱-۲-۳ - آزمون ضربه از ۱۹۲۲ تا ۱۹۳۳: آغاز استاندارد ASTM E23

کمیته E1 در ASTM در سال ۱۹۲۲ نشستی را پیرامون آزمون ضربه مواد به عنوان بخشی از بیست و پنجمین همایش سالانه خود در نیوجرسی امریکا برگزار نمود. در این نشست پیشینه توسعه آزمون ضربه و فعالیت‌های انجمن استانداردهای مهندسی بریتانیا^۲ و برخی از نتایج آزمایشگاهی مرور گردید. در این نشست ۲۳ زمینه مختلف راجع به آزمون ضربه مانند انواع ماشین‌های مورد استفاده، اندازه‌های نمونه و فرایندها طرح گردید و در نهایت به تقاضای ایجاد استاندارد ASTM برای آزمون ضربه پاسخ مثبت داده شد. بر اساس اطلاعات موجود در زمینه‌های مطرح شده، در سال ۱۹۲۳ گروهی در ASTM آماده سازی استاندارد آزمون ضربه پاندولی را آغاز نمودند. تلاش‌ها برای تدوین این استاندارد تا سال ۱۹۳۳ ادامه یافت و سرانجام "روش‌های تجربی آزمون ضربه مواد فلزی" با اختصاص کد ASTM E 23-33T منتشر شد. عنوان "تجربی" که تا پیش از این به کار نرفته بود به معنای مرور فعالیت‌های سالانه و ادامه داشتن روند استاندارد سازی آزمون بود. در ASTM E 23-33T مشخصات ماشین ضربه پاندولی مورد استفاده و دو روش قرار دادن نمونه در ماشین یعنی آزمون شارپی و آزمون آیزود را تعیین شد، اما هندسه لبه چکش ضربه‌زن در آن معین نشده بود. نمونه با شیار V شکل تنها برای آزمون شارپی نشان داده شده و بیان شده بود: "آزمون نوع شارپی می‌تواند بسته به مشخصات ماده با استفاده از نمونه بدون شیار انجام شود، اما آزمون نوع آیزود برای سایر نمونه‌های شیاردار مناسب نیست". اگرچه هندسه هر دو نمونه به دقت بیان شده بود، ولی تفرانس‌ها بسیار محدود کننده بودند. کمیته E1 به بسیاری از عوامل مؤثر بر

1. Derihon

2. British Engineering Standards Association

نتایج آزمون دست یافته بودند، ولی به علت فقدان دانش و اطلاعات مورد نیاز برای تعیین دقیق تفرانسها و مقادیر مناسب، عنوان "تجربی" مورد استفاده قرار گرفته بود. از این پس با رشد دانش و توسعه آزمون شارپی، استاندارد ASTM E 23 به طور پی در پی مورد اصلاح قرار گرفت [۱].

۱-۲-۴- آزمون ضربه از ۱۹۳۴ تا ۱۹۴۰

در سال ۱۹۳۴ استاندارد E 23 با اضافه نمودن یک اندازه برای شعاع سندان و این عبارت که "این نمونه‌ها (شارپی و آیزود) برای آزمون چدن پیشنهاد نمی‌گردد" (بر اساس گزارش کمیته راجع به چدن)، اولین بار اصلاح گردید. در گردهمایی‌های سال‌های ۱۹۳۹ و ۱۹۴۰ کمیته E1 راجع به مشخصات چکش ضربه‌زن به بحث پرداختند و هندسه چکش‌های مورد استفاده در انگلستان و فرانسه بررسی گردید که به ترتیب دارای شعاع نوک ۰/۵۷ و ۲ میلیمتر بودند. به دلایل نامعلومی کمیته شعاع ۸ میلیمتر را مورد تصویب قرار داد و استاندارد ASTM E 23 در سال ۱۹۴۰ به ASTM E 23-41T اصلاح گردید. همچنین در این اصلاح، ترجیح یافتن واحدهای متریک و اضافه شدن نمونه‌های با شیار سوراخ کلیدی و U شکل برای نمونه آزمون شارپی به چشم می‌خورد [۱ و ۴].

۱-۲-۵- آزمون ضربه از ۱۹۴۰ تا ۱۹۴۸

آزمون ضربه روش مفیدی برای سنجش خواص مواد به نظر می‌رسید اما تا زمانی که قابلیت آن برای تعیین تغییر رفتار نرم به ترد فولاد تشخیص داده نشده بود، یک مشخصه تجاری و استاندارد ضروری محسوب نمی‌شد. احتمالاً بزرگ‌ترین انگیزه برای انجام آزمون ضربه به عنوان یک استاندارد ساختمانی و مشخصات ماده، در نتیجه شکستن متعدد کشتی‌های لیبرتی^۱ در مدت جنگ جهانی دوم ایجاد شد و تلاش‌های گسترده جهانی برای فهم شرایط و راه‌های رفع این مشکل منجر به کشف تغییر رفتار نرم به ترد برای فولادها گردید. این شکست‌ها که بدون هیچ تغییر شکل پلاستیک قابل ملاحظه رخ می‌دادند، آنقدر فجیع بودند که دبیر نیروی دریایی امریکا هیئت را گرد هم آورد تا علل رخداد و پیشنهادات موجود برای رفع این مسئله ارزیابی شود. گزارش نهایی این هیئت بیان نمود که از ۴۶۹۴ کشتی تجاری ساخته شده از فولاد با فرایند جوش‌کاری که از سال ۱۹۴۲ تا ۱۹۴۶ بررسی شدند، ۹۷۰ کشتی یعنی بیش از ۲۰ درصد آن‌ها دچار خرابی شده و نیاز به تعمیر داشته‌اند. وسعت این خرابی‌ها از مقادیر کوچک که با توقف در بندرگاه قابل تعمیر بودند، تا شکستن شدید ۸ کشتی که منجر به رها کردن آن‌ها در دریا شده بود، متغیر بودند. دست کم ۲۶ نفر در اثر این شکست‌ها جان باختند و هزینه‌های مالی و جانی ناشی از تعمیر این کشتی‌ها و تأخیر یا نرسیدن کالاهای مورد نیاز جنگ نیز بسیار سنگین بود. برای رفع این مشکل راه‌حلی شامل تغییر در طراحی، تغییر در فرایندها و تجهیزات ساخت و بعلاوه نیاز مقاومت به ضربه برای مواد ساختمانی ارائه گردیدند. فشارهای موجود در زمان جنگ اجازه بررسی و ثبت میزان تاثیر هر یک از این راه‌حل‌ها در گزارش‌های فنی را نمی‌داد، اما مفید بودن این راه‌حل‌ها با کاهش قابل توجه

1. Liberty

شکست‌های ثبت شده از ۱۳۰ خرابی در ماه برای سال ۱۹۴۴ به ۵ خرابی در ماه برای سال ۱۹۴۶ با وجود افزایش تعداد کشتی‌های در دریا از ۲۶۰۰ به ۴۴۰۰ کشتی، مورد تأیید قرار گرفت [۵۱].

پس از جنگ دفتر ملی استاندارد امریکا گزارش خود در ارزیابی ورقه‌های شکسته جدا شده از برخی کشتی‌ها منتشر کرد و اهمیت آزمون ضربه را به طور مستند اثبات نمود. این پژوهش شامل آنالیز شیمیایی، آزمون کشش، بررسی میکروسکوپی، آزمون ضربه و کاهش ضخامت در صفحه‌های شکسته کشتی بود. نتیجه قابل توجه پژوهش این بود که صفحاتی که شکست در آن‌ها متوقف شده بود، انرژی آزمون ضربه بالاتر و دمای انتقال رفتار نرم به ترد (DBTT)^۱ پایین‌تری نسبت به صفحات آغاز شکست داشتند. این نتیجه اهمیت ویژه‌ای داشت، زیرا ارتباط مشابهی در ترکیب شیمیایی، مشخصات آزمون کشش (همه فولادها مقاومت کششی الزامی دفتر استاندارد امریکا را دارا بودند) و یا ریزساختار فولادها با شکست‌های رخ داده مشاهده نگردیده بود. در مجموع این گزارش حداقل چقرمگی لازم ۱۵ پوند- فوت (گرد شده به ۲۰ ژول در سیستم متریک) را بنا نهاد و پیشنهاد شد که معیار حساسیت به شیار می‌بایست در مشخصات الزامی تهیه فولادها و مقدار انرژی شکست شاریپی الزامی (بر اساس شیارهای محتمل سازه‌ای، شرایط نگهداری، دماهای پایین و یا بارگذاری ناگهانی در کاربرد) لحاظ شود [۱].

۱-۲-۶- آزمون ضربه از ۱۹۴۸ تا حال

در سال ۱۹۴۸ بسیاری از استفاده کنندگان بر این عقیده بودند که پراکندگی نتایج بین ماشین‌های اولیه همچنان می‌تواند کاهش یابد بنابراین تلاش برای تعیین دقیق‌تر روش آزمون و پارامترهای اولیه آزمون آغاز گردید. در سال ۱۹۶۴ که در استاندارد ASTM E 23 اصلاحاتی برای کنترل غیر مستقیم صحت آزمون صورت گرفت، متغیرهای اولیه مؤثر بر پراکندگی نتایج کاملاً شناخته شده بودند. در مقاله‌ای در سال ۱۹۶۱ فاهی^۲ عوامل اصلی که مقادیر نادرست انرژی شکست را باعث می‌شوند به قرار زیر بیان نمود:

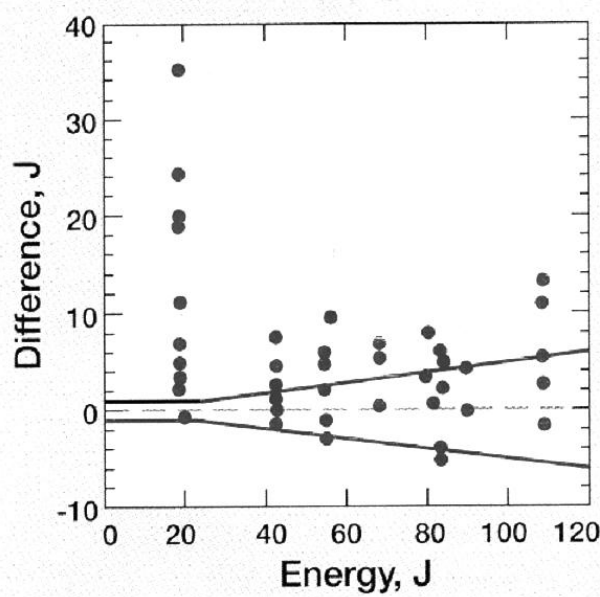
(۱) نصب نامناسب ماشین ضربه، (۲) اندازه‌های نادرست تکیه گاه‌های سندان و لبه چکش، (۳) اصطکاک بیش از حد قطعات متحرک، (۴) لقی در جفت شدگی قطعات، (۵) فضای ناکافی بین دو انتهای نمونه و لبه کناری تکیه گاه‌ها، (۶) ماشین کاری بی‌کیفیت نمونه‌ها و (۷) روش‌های نامناسب سرد کردن و انجام آزمون.

اکنون که این متغیرها در تیرانس‌های ماشین و روش‌های آزمون در استاندارد ASTM E 23 بیان شده بود، واضح گردید که تنها روش مطمئن برای تعیین کارایی یک ماشین ضربه شاریپی، انجام آزمایش با استفاده از نمونه‌های استاندارد شده (نمونه‌های تأیید ماشین ضربه) می‌باشد [۵۱].

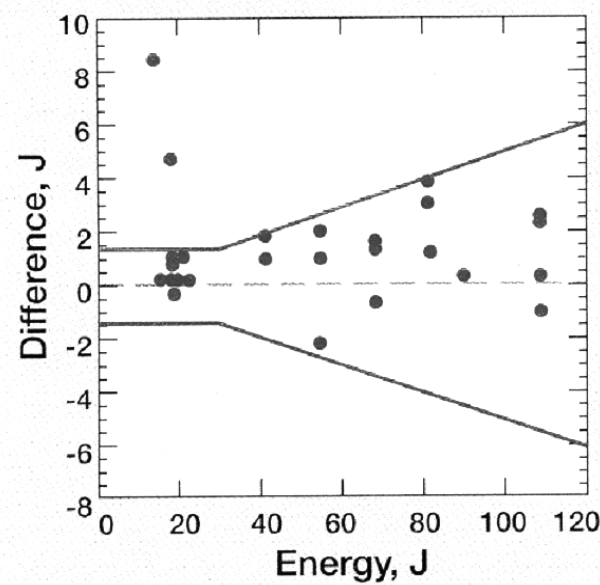
بخش عمده تلاش برای اثبات اینکه آزمون ضربه دارای پراکندگی ذاتی نتایج نیست را می‌توان به دریسکول^۳ در آرسنال^۴ نسبت داد. او محدوده پراکندگی ۱ پوند- فوت (۱/۴ ژول) و ۰.۵٪ را برای تحقیقات خود تعیین نمود. شکل‌های ۱-۲ و ۱-۳ نتایج حاصل از بررسی ماشین‌های ضربه صنعتی با در نظر گرفتن

1. Ductile to Brittle Transition Temperature
2. Fahey
3. Driscoll
4. Watertown Arsenal

این محدوده را نشان می‌دهند. در شکل ۱-۲ نتایج حاصل از اولین آزمون با هر ماشین نشان داده شده است و تنها یک ماشین در محدوده ± 1 پوند- فوت (۱/۴ ژول) که برای سطوح انرژی شکست پایین پیشنهاد شده بود، قرار داشت. نتایج حاصل از آزمون مجدد با استفاده از همان ماشین‌ها پس از تعمیر در شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود به جز دو ماشین، همه ماشین‌ها قابلیت ارضای محدوده ۱/۴ ژول یا ۰.۵٪ را پس از انجام تعمیرات مناسب داشته‌اند. این بررسی نشان داد همه ماشین‌های در حال استفاده نمی‌توانند تجمع و صحت کافی نتایج را حاصل نمایند، اما بیشتر این ماشین‌ها در صورتی که در شرایط مناسب کاری باشند و آزمون با دقت کافی انجام شود، نتایجی در محدوده پراکندگی پیشنهاد شده خواهند داشت [۱۵].



شکل ۱-۲: مقادیر انرژی و انحراف نتایج اولین آزمون‌ها با استفاده از ماشین‌های صنعتی [۱۵].



شکل ۱-۳: مقادیر انرژی و انحراف نتایج مراحل دوم و سوم آزمون‌ها با استفاده از ماشین‌های صنعتی [۱۵].