

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

Đỗ Văn Sĩ

**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA RUNG KHỦ ỨNG SUẤT DƯ ĐẾN ĐỘ
BỀN MỎI CỦA CHI TIẾT**

Chuyên ngành: Cơ học kỹ thuật

Mã số: 9 52 01 01

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

1. TS Bùi Mạnh Cường
2. TS Nguyễn Văn Dương

HÀ NỘI- NĂM 2022

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

ĐỖ VĂN SĨ

**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA RUNG KHỦ ỨNG SUẤT DƯ ĐẾN ĐỘ
BỀN MỎI CỦA CHI TIẾT**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI- NĂM 2022

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả nêu trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ một công trình nào khác.

Tác giả

Đỗ Văn Sĩ

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu sinh xin được gửi lời cảm ơn chân thành đến tập thể giáo viên hướng dẫn khoa học TS. Bùi Mạnh Cường, TS. Nguyễn Văn Dương đã tận tình hướng dẫn trong quá trình học tập và thực hiện luận án này.

Nghiên cứu sinh cũng xin gửi lời cảm ơn đến các thầy trong bộ môn Cơ học máy, khoa Cơ khí đã có những đóng góp quý báu trong suốt quá trình hoàn thành luận án.

Nghiên cứu sinh xin cảm ơn các chuyên gia, các nhà khoa học trong và ngoài Học viện Kỹ thuật Quân sự đã có những đóng góp chân thành và quý giá giúp nghiên cứu sinh trong suốt hành trình nghiên cứu khoa học từ trước đây cho tới nay.

Đặc biệt, nghiên cứu sinh muốn gửi lời cảm ơn đến gia đình, người thân đã tạo mọi điều kiện về thời gian, động viên về tinh thần giúp nghiên cứu sinh toàn tâm toàn ý vào thực hiện luận án.

Tác giả

Đỗ Văn Sĩ

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC	iii
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT VÀ KÝ HIỆU	vii
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU	xii
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ	xiii
MỞ ĐẦU	1
Chương 1 TỔNG QUAN VỀ CÔNG NGHỆ RUNG KHỬ ỨNG SUẤT DƯ	5
1.1. Tổng quan về ứng suất dư và ảnh hưởng của ứng suất dư.....	5
1.1.1. <i>Tổng quan về ứng suất dư.</i>	5
1.1.2. <i>Các phương pháp xác định ứng suất dư.</i>	6
1.1.3. <i>Ảnh hưởng của ứng suất dư đến độ bền của kết cấu.</i>	7
1.2. Phương pháp khử ứng suất dư.....	9
1.2.1. <i>Các phương pháp sử dụng nhiệt.</i>	10
1.2.2. <i>Khử ứng suất dư bằng các phương pháp cơ học.</i>	12
1.3. Khử ứng suất dư bằng phương pháp rung.....	15
1.3.1. <i>Quá trình phát triển công nghệ rung khử ứng suất dư.</i>	15
1.3.2. <i>Nguyên lý tích thoát ứng suất dư nhờ tải trọng.</i>	18
1.3.3. <i>Thiết bị, nguyên lý hoạt động của hệ thống rung khử ứng suất dư.</i> ...	20
1.3.4. <i>Ưu nhược điểm của công nghệ rung khử ứng suất dư.</i>	23
1.4. Một số kết quả nghiên cứu đã công bố về rung khử ứng suất dư.	24
1.4.1. <i>Nghiên cứu về khả năng giảm ứng suất dư.</i>	24
1.4.2. <i>Nghiên cứu về ảnh hưởng của rung khử ứng suất dư tới các đặc trưng mỏi của kết cấu.</i>	29
1.4.3. <i>Một số vấn đề rút ra từ tình hình nghiên cứu công nghệ rung khử ứng suất dư.</i>	33

1.5. Định hướng nghiên cứu và các nhiệm vụ của luận án.	34
Kết luận chương 1	35
Chương 2 CƠ SỞ LÝ THUYẾT RUNG KHỬ ỨNG SUẤT DƯ VÀ XÁC ĐỊNH ĐẶC TRƯNG BỀN MỎI CỦA CHI TIẾT CÓ ỨNG SUẤT DƯ	36
2.1. Cơ sở quá trình hình thành ứng suất dư và rung khử ứng suất dư.....	37
2.1.1. <i>Mô hình truyền nhiệt.</i>	37
2.1.2. <i>Sự hình thành ứng suất do quá trình gia nhiệt.</i>	41
2.1.3. <i>Xây dựng phương trình chuyển động của chi tiết khi rung khử ứng suất dư.</i>	45
2.1.4. <i>Sơ đồ tính toán, mô phỏng rung khử ứng suất dư.</i>	54
2.2. Xác định các đặc trưng bền mỏi của chi tiết sau rung khử ứng suất dư	58
2.2.1. <i>Cơ sở xác định giới hạn bền mỏi.</i>	58
2.2.2. <i>Phương pháp số xác định sự thay đổi giới hạn bền mỏi của chi tiết sau rung khử ứng suất dư.</i>	61
2.2.3. <i>Xác định mức thay đổi tuổi thọ mỏi của chi tiết sau rung khử ứng suất dư.</i>	62
2.2.4. <i>Sơ đồ tính mức thay đổi các đặc trưng bền mỏi của chi tiết sau rung khử ứng suất dư</i>	66
Kết luận chương 2	68
Chương 3 MÔ PHỎNG RUNG KHỬ ỨNG SUẤT DƯ VÀ TÍNH MỨC THAY ĐỔI CÁC ĐẶC TRƯNG MỎI CỦA CHI TIẾT SAU RUNG KHỬ	69
3.1. Mô phỏng ứng suất dư do quá trình gia nhiệt.	70
3.1.1. <i>Mô hình mô phỏng ứng suất dư do quá trình gia nhiệt.</i>	70
3.1.2. <i>Kết quả mô phỏng ứng suất dư do quá trình gia nhiệt</i>	72
3.2. Mô phỏng quá trình rung khử ứng suất dư.....	73
3.2.1. <i>Khảo sát mối quan hệ giữa biên độ gia tốc dao động với ứng suất hình thành trên chi tiết mẫu</i>	74

3.2.2. Thông số đầu vào bài toán mô phỏng rung khử.....	76
3.2.3. Tham số các đặc trưng của các chế độ rung khử ứng suất dư.	77
3.2.4. Kết quả mô phỏng rung khử ứng suất dư.....	77
3.3. Tính mức thay đổi giới hạn mỏi của chi tiết mẫu sau rung khử.	80
3.3.1. Kiểm tra độ tin cậy của chương trình tính.	80
3.3.2. Kết quả tính mức thay đổi giới hạn mỏi.	82
3.4. Tính mức thay đổi tuổi thọ mỏi của chi tiết mẫu sau rung khử.	83
Nhận xét kết quả mô phỏng, tính toán:	84
Kết luận chương 3	85
Chương 4 THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH ĐẶC TÍNH BỀN MỎI CỦA CHI TIẾT SAU RUNG KHỬ ỨNG SUẤT DƯ'	87
4.1. Phát triển phương pháp thí nghiệm mỏi trên hệ thống LDS.	88
4.1.1. Phương pháp thí nghiệm mỏi trên hệ thống LDS.	88
4.1.2. Xử lý kết quả thí nghiệm.....	90
4.1.3. Chuẩn bị thí nghiệm.	91
4.2. Chi tiết mẫu và khảo sát đáp ứng của chi tiết mẫu.....	92
4.2.1. Thiết kế và chế tạo chi tiết mẫu.	92
4.2.2. Xác định các đặc trưng cơ học và đáp ứng của chi tiết mẫu.	93
4.2.3. Xác định ứng suất dư của chi tiết mẫu sau khi gia nhiệt.	94
4.2.4. Khảo sát biến dạng - gia tốc và tần số riêng của chi tiết mẫu.	95
4.3. Thí nghiệm rung khử ứng suất dư và thí nghiệm mỏi.....	99
4.3.1. Rung khử ứng suất dư.	99
4.3.2. Thí nghiệm xác định đặc trưng bền mỏi.....	101
4.3.3. Kết quả thí nghiệm và thảo luận.	102
Kết luận Chương 4	111
KẾT LUẬN CHUNG.....	113
DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN	114

TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	116
PHỤ LỤC	125

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT VÀ KÝ HIỆU

1. Chữ viết tắt:

USD	Ứng suất dư
VSR	Vibratory Stress Relief (Rung khử ứng suất dư)
NCS	Nghiên cứu sinh
TVSR	Thermal Vibration Stress Relief (Khử USD bằng nhiệt kết hợp dao động)
UVSR	Ultrasonic Vibratory Stress Relief (Khử USD nhờ sóng siêu âm)

2. Ký hiệu:

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
A	m/s^2	Biên độ gia tốc rung khử
a	m/s^2	Gia tốc rung khử
$[B]$		Ma trận về mối quan hệ chuyển vị -biến dạng
b	N	Lực khối
c	$\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$	Nhiệt dung riêng
C		Hệ số đường cong mỏi
$[C]$		Ma trận cản của chi tiết
$[C_e^t]$		Ma trận nhiệt dung riêng phần tử
$[C']$		Ma trận cản nhiệt của chi tiết
$[D]$		Ma trận về mối quan hệ ứng suất biến dạng đàn hồi
$[D]_{ep}^*$		Ma trận về mối quan hệ ứng suất biến dạng đàn dẻo
D_0		Tổn thất mỗi chi tiết không khử ứng suất dư
D_1		Tổn thất mỗi chi tiết khi rung khử ứng suất dư
$D_{\sigma m2}$		Tổn thất mỗi chi tiết sau mỗi chu kỳ tải $\sigma_m^{(2)}$
$D_{\sigma m1}$		Tổn thất mỗi chi tiết sau mỗi chu kỳ tải $\sigma_m^{(1)}$
D_r		Tổn thất mỗi chi tiết do rung khử ứng suất
d	MPa	Gia số tải
E	GPa	Modul đàn hồi
$f(x_i, y_i, z_i)$		Hàm tọa độ không thứ nguyên

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
f_i		Số mẫu tại mức ứng suất i
f	Hz	Tần số dao động riêng của mẫu
f		Hàm chảy dẻo
$\{F^{th}\}$		Véc tơ tải trọng nhiệt của phần tử
$\{F\}$		Véc tơ tải trọng nhiệt của chi tiết
F		Bề mặt chảy dẻo của vật liệu
g	m/s^2	Gia tốc trọng trường
g		Hàm thế năng dẻo
h_f		Hệ số đối lưu nhiệt
$J_m(\xi, \eta, \iota)$		Ma trận Jacobi
k		Hằng số phụ thuộc vào loại vật liệu
$[K^{tr}]$		Ma trận hệ số truyền nhiệt
$[K]$		Ma trận độ cứng của chi tiết
$[K']$		Ma trận độ cứng nhiệt của chi tiết
k_d		Hệ số tải trọng động
$[K_0]$		Ma trận độ cứng do hình dạng chi tiết
$[K_T]$		Ma trận độ cứng tiếp của chi tiết
$[K_\sigma]$		Ma trận độ cứng chi tiết do ứng suất dư
$[K_L]$		Ma trận độ cứng do chuyển vị lớn
$[K_R]$		Ma trận độ cứng hiệu chỉnh
K_x^{tr}	$W/(m.^0C)$	Hệ số dẫn nhiệt lần lượt theo các hướng x
K_y^{tr}	$W/(m.^0C)$	Hệ số dẫn nhiệt lần lượt theo các hướng y
K_z^{tr}	$W/(m.^0C)$	Hệ số dẫn nhiệt lần lượt theo các hướng z
$[K_e^{tb}]$		Ma trận hệ số dẫn nhiệt phần tử
$[K_e^{tc}]$		Ma trận hệ số truyền nhiệt đối lưu của phần tử
$[K_e]$		Ma trận độ cứng của phần tử
$\{L\}$		Véc tơ cột gradient
m		Số mũ đường cong mỏi
m_w		Thông số phân bố Weibull
$[m_e]$		Ma trận khối lượng phần tử
$[M]$		Ma trận khối lượng chi tiết

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
nod		Số nút của phần tử
N	Chu kỳ	Số chu kỳ ứng suất tương ứng trên đường cong mỏi
N_e		Số lượng phần tử được mô hình hóa
$[N]$		Ma trận hàm dạng
N_0	Chu kỳ	Chu kỳ cơ sở
N_i	Chu kỳ	Số chu kỳ của mức ứng suất σ_i trên đường cong mỏi
$\bar{N}_2$	Chu kỳ	Tuổi thọ kết cấu được rung khử ứng suất dư
$\bar{N}_1$	Chu kỳ	Tuổi thọ kết cấu không rung khử ứng suất dư
n_A		Số biên độ ứng suất khác nhau khi chi tiết làm việc
n_i	Chu kỳ	Số chu kỳ thực của mức ứng suất σ_i
n_R		Số biên độ ứng suất trong quá trình làm việc
p	N	Tải trọng phân bố
$P(\sigma), P$		Xác suất phá hủy khi ứng suất nhỏ hơn σ
$\{q^h\}$		Véc tơ dòng nhiệt
$\{q\}$		Véc tơ chuyển vị nút phần tử
$\bar{q}$	J	Dòng nhiệt qua bề mặt S_2
Q	J	Lượng nhiệt sinh ra của một đơn vị thể tích
$\{Q_e^f\}$		Véc tơ lưu lượng nhiệt của phần tử
$\{Q_e^c\}$		Véc tơ dòng nhiệt đối lưu qua bề mặt phần tử
$\{Q_e^g\}$		Véc tơ tải trọng sinh nhiệt của phần tử
$\{Q\}$		Véc tơ tải nhiệt tác dụng lên chi tiết
R		Hệ số phi đối xứng của chu kỳ tải
r	m	Bán kính đặc trưng của phân bố dòng
S_u		Biên liên kết
t	s	Thời gian
t_r, t_f	s	Thời gian rung và thời gian không đặt tải sau rung
T	$^{\circ}\text{C}$	Nhiệt độ
T_{cep}	s	Chu kỳ dao động tự do nhỏ nhất của chi tiết
Δt	s	Bước thời gian
$\bar{T}$	$^{\circ}\text{C}$	Nhiệt độ đã biết trên bề mặt S_1 nào đấy
T_B	$^{\circ}\text{C}$	Nhiệt độ môi trường

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
T_e	$^{\circ}\text{C}$	Nhiệt độ nút phân tử
W		Mức năng lượng đầu vào
W^d	J	Động năng
W_e^d	J	Động năng của phân tử
u	m	Chuyển vị phân tử
U	J	Công nội lực
u_w		Các thông số phân bố Weibull
V	m^3	Thể tích của vật thể
ΔV_i	m^3	Phần thể tích thứ i của vật thể
V_0	m^3	Thể tích đơn vị
$V^{(i)}$	m^3	Thể tích qui đổi
v	m/s	Vận tốc di chuyển của nguồn nhiệt
V_e	m^3	Thể tích phân tử
$V_{ELm}^{(1)}$	m^3	Thể tích qui đổi của phân tử thứ m của mẫu
$V_{ELm}^{(2)}$	m^3	Thể tích qui đổi của phân tử thứ m của chi tiết
W_i, W_j, W_k		Trọng số theo trục ξ, η, ι
$\{\bar{\alpha}\}$		Véc tơ dịch chuyển bề mặt chảy
α		Hệ số cản khối lượng
α_w		Thông số phân bố
α_{σ}		Hệ số tập trung ứng suất lý thuyết
$\alpha(T)$		Hệ số giãn nở nhiệt
β		Hệ số cản độ cứng
Γ		Hàm Gama
δ_1	%	Biến dạng tương đối tại điểm 1
δ_3	%	Biến dạng tương đối tại điểm 3
ε	m	Biến dạng tổng tại điểm khảo sát
ε_p	m	Biến dạng dẻo
ε_e	m	Biến dạng đàn hồi
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$		Biến dạng theo phương x, y, z
$\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz},$	m	Biến dạng trong mặt phẳng xOy, yOz, zOx

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$\{\varepsilon\}$		Véc tơ biến dạng tổng thể
$\{\varepsilon^{el}\}$		Véc tơ biến dạng đàn hồi
$\{\varepsilon^{th}\}$		Véc tơ biến dạng nhiệt
$\{\eta\}$		Véc tơ pháp tuyến đơn vị của bề mặt phần tử
λ		Hệ số bất định
ν_{σ}		Hệ số độ nhạy của vật liệu
ρ	Kg/m ³	Khối lượng riêng của vật chất
$\{\bar{\sigma}\}$		Véc tơ biến ứng suất dạng 9 thành phần
σ	MPa	Ứng suất
σ_w	MPa	Thông số phân bố Weibull
σ_0	MPa	Ứng suất thấp nhất cho sự kiện xuất hiện ít hơn
$\sigma_{\max}$	MPa	Ứng suất lớn nhất
$\sigma_{\min}$	MPa	Ứng suất nhỏ nhất
σ_a	MPa	Biên độ ứng suất
σ_m	MPa	Ứng suất trung bình
σ_{m0}	MPa	Ứng suất dư của chi tiết không rung khử
σ_{m1}	MPa	Ứng suất dư của chi tiết sau rung khử
σ_R	MPa	Giới hạn mỏi ứng với loại tải có tỷ số phi đối xứng R
σ_{-1}	MPa	Giới hạn mỏi tương ứng với loại tải mạch động
σ_1	MPa	Ứng suất dư ban đầu tại điểm khảo sát,
σ_2	MPa	Ứng suất sau khi đặt tải trọng động
σ_3	MPa	Ứng suất sau tái bền
σ_t	MPa	Ứng suất tĩnh do ngoại lực gây ra
σ_d	MPa	Ứng suất động
σ_{ch}	MPa	Giới hạn chảy của vật liệu
σ_B	MPa	Giới hạn bền của vật liệu
$\sigma_R^{(1)}, \sigma_R^{(2)}$	MPa	Giới hạn bền mỏi của chi tiết trước và sau rung khử
σ_s	MPa	Độ lệch chuẩn
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	MPa	Ứng suất pháp theo phương x, y, z
$\sigma_{xy},$	MPa	Ứng suất tiếp trong mặt phẳng xOy, yOz, zOx
τ	s	Độ trễ

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 3. 1: Sự phụ thuộc của tính chất vật liệu vào nhiệt độ.....	71
Bảng 3. 2: Các hệ giảm chấn Rayleigh.	75
Bảng 3. 3: Các tham số liên quan đến các chế rung khử ứng suất dư	77
Bảng 3. 4: Các đặc trưng cơ học của vật liệu làm các mẫu thử.....	81
Bảng 3. 5: Kết quả kiểm tra độ tin cậy của chương trình FEM-Fatigue.....	82
Bảng 4. 1: Thành phần vật liệu thép dùng cho chi tiết mẫu thí nghiệm.	92
Bảng 4. 2: Đặc tính cơ học của vật liệu làm chi tiết mẫu.	93
Bảng 4. 3: Giá trị ứng suất dư đo được trên chi tiết mẫu.....	94
Bảng 4. 4: Các chế độ rung khử ứng suất dư được áp dụng trong thí nghiệm.	100
Bảng 4. 5: Phương trình đường cong mỏi của các nhóm chi tiết sau rung...	107

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

Hình 1. 1: Sự cong vênh của thang máy bay sau hàn	8
Hình 1. 2: Hiện tượng cong vênh của phôi đúc sau gia công	8
Hình 1. 3: Sự nứt trong thỏi nhôm đúc do ứng suất dư	8
Hình 1. 4: Lò nung nhiệt luyện	10
Hình 1. 5: Nung nóng cục bộ bằng tấm nung Ceramic	11
Hình 1. 6: Nung nóng bằng bức xạ để duy trì nhiệt độ giữa hai lần hàn	12
Hình 1. 7: Tích thoát ứng suất dư bằng cách đặt tải trọng kéo	13
Hình 1. 8: Phun bi xử lý bề mặt	14
Hình 1. 9: Kết cấu hàn được khử ứng suất dư bằng rung lắc	17
Hình 1. 10: Rung khử ứng suất dư tại Việt Nam	18
Hình 1. 11: Nguyên lí cơ học của công nghệ rung khử ứng suất dư	19
Hình 1. 12: Hệ thống thiết bị được lắp đặt để rung khử ứng suất dư	20
Hình 1. 13: Tần số cộng hưởng của chi tiết, kết cấu.....	21
Hình 1. 14: Sự thay đổi tần số cộng hưởng sau rung khử ứng suất dư.....	22
Hình 1. 15: Tần số cộng hưởng của chi tiết trong các lần quét	23
Hình 2. 1: Mô tả nguồn nhiệt di động	38
Hình 2. 2: Sơ đồ thuật toán thuật toán bài toán Nhiệt- Cơ	44
Hình 2. 3: Vật thể chịu lực	47
Hình 2. 4: Sơ đồ tính toán ứng suất dư sau quá trình rung khử.....	57
Hình 2. 5: Chia vật thể theo mô hình phá hủy giòn của Weibull.....	59
Hình 2. 6: Sơ đồ tính toán tính mức thay đổi các đặc trưng bền mỏi	67
Hình 3. 1: Chi tiết mẫu trong thí dụ mô phỏng tính toán.....	70
Hình 3. 2: Chia lưới phần tử chi tiết mẫu.	71
Hình 3. 3: Nhiệt độ tạo bởi nguồn nhiệt di động trên chi tiết mẫu.	72
Hình 3. 4: Ứng suất dư trên chi tiết mẫu và mặt cắt A-A do quá trình gia nhiệt	73

Hình 3. 5: Hệ số giảm chấn của chi tiết mẫu gá trên đầu rung LDS.	74
Hình 3. 6: Tìm tần số dao động riêng của chi tiết mẫu bằng mô phỏng.....	75
Hình 3. 7: Sự phụ thuộc ứng suất tại mặt cắt A-A vào biên độ rung động.....	76
Hình 3. 8: Phân bố ứng suất dư trước và sau rung khử.	78
Hình 3. 9: Giá trị ứng suất dư lớn nhất còn lại sau rung khử.	79
Hình 3. 10: Mẫu chuẩn tính giới hạn mỏi.	80
Hình 3. 11: Chi tiết kiểm tra chương trình tính.....	81
Hình 3. 12: Chi tiết có ứng suất dư chịu kéo.	81
Hình 3. 13: Mức tăng giới hạn mỏi của chi tiết mẫu	83
Hình 3. 14: Mức thay đổi tuổi thọ mỏi chi tiết mẫu theo các chế độ rung khử.	84
Hình 4. 1: Sơ đồ bước thí nghiệm tìm giới hạn mỏi.	88
Hình 4. 2: Biểu diễn kết quả thí nghiệm theo phương pháp bậc thang.....	89
Hình 4. 3: Biểu diễn kết quả thí nghiệm theo phương pháp bậc thang cải tiến.	90
Hình 4. 4: Các chi tiết mẫu thí nghiệm được chế tạo.....	92
Hình 4. 5: Chi tiết mẫu được tạo ứng suất dư bằng nhiệt.	93
Hình 4. 6: Kéo chi tiết mẫu xác định đặc tính cơ học tĩnh.	93
Hình 4. 7: Đo ứng suất dư bằng phương pháp khoan lỗ.....	94
Hình 4. 8: Tem đo biến dạng được dán trên chi tiết mẫu.	95
Hình 4. 9: Kiểm tra đáp ứng tải tĩnh của tem đo biến dạng.....	95
Hình 4. 10: Gá đặt chi tiết mẫu cần tìm tần số dao động riêng trên đầu rung.	96
Hình 4. 11: Đáp ứng tần số của chi tiết mẫu (đo trên 3 chi tiết mẫu).....	96
Hình 4. 12: Khảo sát mối quan hệ biên độ gia tốc rung và biên độ biến dạng.	97
Hình 4. 13: Mối quan hệ giữa biên độ biến dạng mẫu và biên độ gia tốc rung.	98

Hình 4. 14: Mối quan hệ giữa ứng suất động σ và biên độ gia tốc rung A. ...	98
Hình 4. 15: Sự thay đổi tần số dao động riêng của chi tiết mẫu	99
Hình 4. 16: Ứng suất dư còn lại sau rung với các biên độ gia tốc.	100
Hình 4. 17: Nhóm chi tiết mẫu không rung khử ứng suất dư.	102
Hình 4. 18: Nhóm chi tiết mẫu rung với biên độ gia tốc $29,2 \text{ m/s}^2$	102
Hình 4. 19: Nhóm chi tiết mẫu rung với biên độ gia tốc $43,3 \text{ m/s}^2$	103
Hình 4. 20: Nhóm chi tiết mẫu rung với biên độ gia tốc $57,4 \text{ m/s}^2$	103
Hình 4. 21: Nhóm chi tiết mẫu rung với biên độ gia tốc $71,4 \text{ m/s}^2$	103
Hình 4. 22: Nhóm chi tiết mẫu rung với biên độ gia tốc $99,5 \text{ m/s}^2$	104
Hình 4. 23: Nhóm chi tiết mẫu rung với biên độ gia tốc $155,8 \text{ m/s}^2$	104
Hình 4. 24: Giới hạn mỏi của các nhóm chi tiết mẫu theo biên độ gia tốc rung	104
Hình 4. 25: Tuổi thọ của nhóm chi tiết mẫu chưa rung khử ứng suất dư.....	106
Hình 4. 26: Tuổi thọ của nhóm chi tiết mẫu rung khử với mức $29,2 \text{ m/s}^2$...	106
Hình 4. 27: Tuổi thọ của nhóm chi tiết mẫu rung khử với mức $43,3 \text{ m/s}^2$...	106
Hình 4. 28: Tuổi thọ của nhóm chi tiết mẫu rung khử với mức $57,4 \text{ m/s}^2$...	106
Hình 4. 29: Tuổi thọ của nhóm chi tiết mẫu rung khử với mức $71,4 \text{ m/s}^2$...	106
Hình 4. 30: Tuổi thọ của nhóm chi tiết mẫu rung khử với mức $99,5 \text{ m/s}^2$...	106
Hình 4. 31: Tuổi thọ của nhóm chi tiết mẫu rung khử với mức $155,8 \text{ m/s}^2$.	107
Hình 4. 32: Các đường cong mỏi của các nhóm chi tiết mẫu	108
Hình 4. 33: So sánh kết quả mô phỏng và thí nghiệm.	109

MỞ ĐẦU

Tính cấp thiết của đề tài

Ngày nay, công nghệ hàn và đúc có thể tạo ra nhiều loại sản phẩm phục vụ các nhu cầu của xã hội, như các kết cấu giàn thép khai thác dầu khí trên biển, các máy móc thiết bị trong khai thác khoáng sản, bộ phận máy và kết cấu trong các nhà xưởng, trong công nghiệp, nông nghiệp, thủy lợi, xây dựng đến các phương tiện giao thông như máy bay, ô tô... Đặc điểm chung của các hệ thống này là làm việc dưới tác dụng của tải trọng thay đổi, do vậy khi làm việc lâu dài, các chi tiết trong hệ thống sẽ bị phá hỏng vì mỏi. Hiện tượng mỏi gây nên sự phá hủy chi tiết một cách đột ngột làm hỏng hệ thống, thiệt hại kinh tế và ảnh hưởng tới tính mạng người sử dụng.

Trên thế giới và trong nước, đến nay đã có nhiều tác giả nghiên cứu về hiện tượng mỏi của vật liệu và đánh giá về các đặc trưng bền mỏi của chúng, trên cơ sở đó sẽ đưa ra dự đoán thời gian làm việc cho tới khi xảy ra hỏng hóc của hệ thống (tuổi thọ). Các công trình nghiên cứu cho thấy vết nứt mỏi thường xảy ra tại vị trí có tập trung ứng suất, đặc biệt là tại các mối hàn. Đối với loại kết cấu này, vị trí được quan tâm nhiều nhất là vị trí ở xung quanh chân mối hàn, do ở đây tồn tại ứng suất dư (USD) và sự tập trung ứng suất lớn. Muốn tăng tuổi thọ mỏi của chúng điều cần thiết là phải làm giảm USD và giảm ứng suất tập trung. Giảm USD cho kết cấu hàn có thể thực hiện nhờ một số phương pháp như: ủ khử, già hóa tự nhiên, rung động,... Trong số đó, rung khử ứng suất dư (Vibratory Stress Relief - VSR) cho kết cấu nói chung và mối hàn nói riêng có những ưu điểm nổi trội mà các phương pháp xử lý nhiệt truyền thống không thể có được. Trên thế giới, phương pháp này đã được áp dụng từ vài chục năm gần đây và ngày càng được phát triển. Tại Việt Nam, phương pháp VSR còn ít được quan tâm, trong khi nhu cầu sử dụng các

kết cấu hàn lại khá nhiều. Gần đây, các máy VSR đã được nghiên cứu chế tạo thành công tại Việt Nam, điển hình như tại Học viện Kỹ thuật Quân sự, điều này đã mở ra nhiều cơ hội cho các ứng dụng và nghiên cứu. Trên thế giới, các công trình nghiên cứu cho đến nay chỉ mới tập trung làm rõ mối quan hệ giữa chế độ VSR (như tần số, biên độ, thời gian) và mức độ suy giảm USD trong mối hàn, mà chưa có công trình nào nghiên cứu một cách chuyên sâu, toàn diện vấn đề ảnh hưởng của các tham số công nghệ VSR tới độ bền mỏi và tuổi thọ mỏi của chi tiết, kết cấu.

Vì vậy đề tài “*Nghiên cứu ảnh hưởng của rung khử ứng suất dư đến độ bền mỏi của chi tiết*” được đề xuất thực hiện nhằm góp phần làm rõ mức độ ảnh hưởng tổng hợp của các tham số mô tả quá trình VSR tới độ bền mỏi chi tiết, qua đó xây dựng cách đánh giá đúng đắn độ bền mỏi của chi tiết sau rung, đề xuất chế độ VSR hợp lý để đạt được hiệu quả cao, và dự đoán chính xác tuổi thọ mỏi, tăng độ tin cậy, an toàn trong quá trình sử dụng.

Đối tượng nghiên cứu

Các chi tiết mẫu có USD do quá trình gia nhiệt và các tham số trong chế độ rung khử USD.

Mục tiêu nghiên cứu

Làm rõ mối quan hệ giữa các tham số trong chế độ VSR đến USD và các đặc trưng bền mỏi của chi tiết. Từ đó đề xuất một số chế độ VSR hợp lý cho chi tiết.

Phạm vi nghiên cứu

Nghiên cứu ảnh hưởng của biên độ và thời gian VSR tới khả năng cải thiện USD và các đặc trưng bền mỏi của chi tiết.

Phương pháp nghiên cứu

Luận án sử dụng phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp với mô

phỏng số và thực nghiệm.

Nghiên cứu lý thuyết để xây dựng các phương trình dao động và thành lập các công thức, hệ thức tính. Sử dụng mô phỏng và chương trình tính toán số để giải các bài toán đặt ra. Thí nghiệm với các chi tiết thực trên thiết bị tạo rung để kiểm tra tính đúng đắn của các chương trình tính.

Ý nghĩa của luận án

- *Về ý nghĩa khoa học:* Kết quả nghiên cứu của luận án góp phần làm sáng tỏ mối quan hệ của các tham số VSR với các đặc trưng bền mỏi của kết cấu có USD, qua đó xác định bộ tham số công nghệ phù hợp với một số trường hợp cụ thể.

- *Về ý nghĩa thực tiễn:* Kết quả nghiên cứu của luận án góp phần hoàn thiện qui trình công nghệ, nâng cao năng suất, chất lượng và hiệu quả sản xuất của quá trình khử ứng suất dư bằng rung động.

Bố cục luận án

Luận án được trình bày trong 4 chương chính:

Chương 1: Tổng quan về công nghệ rung khử ứng suất dư, chương này trình bày các vấn đề cơ bản về USD, các phương pháp đo và khử USD, trong đó trình bày chi tiết các nội dung liên quan tới công nghệ VSR. Thông qua việc tìm hiểu và phân tích các kết quả nghiên cứu đạt được của các tác giả trong và ngoài nước, luận án sẽ xác định những vấn đề cần phải quan tâm.

Chương 2: Cơ sở lý thuyết rung khử ứng suất dư và xác định đặc trưng bền mỏi của chi tiết có ứng suất dư. Nội dung chương 2 đề cập đến việc thành lập các công thức để mô tả sự hình thành USD, quá trình VSR và đánh giá khả năng cải thiện các đặc trưng bền mỏi của công nghệ VSR. Từ các công

thức đã thành lập được, luận án đề xuất sơ đồ tính toán làm cơ sở xây dựng các chương trình tính toán, mô phỏng tổng quát.

Chương 3: Mô phỏng rung khử ứng suất dư và tính toán mức độ thay đổi các đặc trưng mỏi của chi tiết sau rung. Chương này sẽ thực hiện mô phỏng, tính toán số cho chi tiết mẫu cụ thể với các giả thiết, ràng buộc tương đương với điều kiện thí nghiệm. Kết quả mô phỏng và tính toán thu được, cho phép phân tích làm rõ ảnh hưởng của các tham số trong chế độ rung khử tới các đặc trưng mỏi của chi tiết mẫu.

Chương 4: Thực nghiệm xác định các đặc trưng bền mỏi của chi tiết sau rung khử ứng suất dư. Chương này sẽ xây dựng phương pháp thực nghiệm mỏi gia tốc phù hợp với trang thiết bị hiện có, tiến hành VSR và thực nghiệm để xác định các đặc trưng mỏi của chi tiết mẫu trước và sau khi rung khử. Kết quả thực nghiệm cho phép đánh giá độ tin cậy của các chương trình mô phỏng và tính toán.

Ngoài 4 chương chính nêu trên, luận án còn bao gồm phần giới thiệu chung, phần kết luận chung trình bày khái quát những kết quả nghiên cứu đạt được của luận án, danh mục các công trình khoa học của NCS công bố có liên quan đến luận án, phần phụ lục thể hiện các trang thiết bị đo đạc thí nghiệm và chương trình tính.

Chương 1

TỔNG QUAN VỀ CÔNG NGHỆ RUNG KHỬ ỨNG SUẤT DƯ

1.1. Tổng quan về ứng suất dư và ảnh hưởng của ứng suất dư.

1.1.1. Tổng quan về ứng suất dư.

USD là ứng suất tồn tại trong chi tiết hoặc kết cấu sau quá trình gia công vật liệu, và chưa chịu tác dụng của ngoại lực hay gradient nhiệt độ nào. Do không chịu tác dụng của ngoại lực hoặc gradient nhiệt độ nào nên mặc dù tồn tại USD nhưng lực tổng hợp và mômen tổng hợp được sinh ra bởi USD trên toàn bộ chi tiết bằng không.

Theo phạm vi tác dụng, USD được phân thành hai loại:

- USD thô đại: Là USD tồn tại trong phạm vi từng phần của chi tiết và cân bằng trong phạm vi toàn bộ chi tiết. Nguyên nhân của USD thô đại thường là do sự biến dạng không đều giữa các phần của chi tiết, việc xuất hiện ứng suất để duy trì sự toàn vẹn của vật thể.

- USD tế vi: Là USD tồn tại và được cân bằng trong phạm vi từng phần nhỏ của hạt hay từng hạt. Nguyên nhân của USD tế vi là do biến dạng dẻo xảy ra không đồng nhất trong các hạt, do sự uốn cong của các mặt trượt khi quay, do trường ứng suất của các lệch và tập hợp lệch.

Trong thực tế kỹ thuật, người ta thường chỉ quan tâm đánh giá USD thô đại và nghiên cứu các đặc trưng của loại USD này gây bởi các phương pháp gia công khác nhau. Lý do là vì USD thô đại có ảnh hưởng mạnh đến khả năng chịu tải, tính chịu ăn mòn và trong nhiều trường hợp là nguyên nhân gây nứt vỡ, cong vênh dẫn đến loại bỏ chi tiết.

1.1.2. Các phương pháp xác định ứng suất dư.

Các phương pháp xác định USD có thể được chia thành hai nhóm:

a) Nhóm các phương pháp cơ học (các phương pháp phá hủy và bán phá hủy) dựa trên sự đo biến dạng tích thoát khi bóc đi một phần vật liệu trên chi tiết. Nhóm này bao gồm các phương pháp [29, 49]:

+ **Khoan lỗ**: Sau khi dán tem đo biến dạng tại vị trí đo USD, tạo một lỗ nhỏ bằng cách khoan, sự thoát biến dạng dư vào lỗ đó được đo và đánh giá, do vậy USD được xác định. Ưu điểm: nhanh, đơn giản, phổ biến rộng rãi, thiết bị linh hoạt, áp dụng cho nhiều loại vật liệu. Nhược điểm: phôi bị phá hoại, xử lý số liệu phức tạp, hạn chế bởi độ nhạy và chính xác của cảm biến đo.

+ **Đo độ võng do uốn**: Phương pháp này dựa vào hiện tượng cong vênh (uốn) chi tiết khi trong nó tồn tại USD. Phương pháp này tương đối đơn giản, áp dụng cho nhiều loại vật liệu, có thể kết hợp với các phương pháp khác để cho ra biên dạng ứng suất. Nhược điểm: chỉ phù hợp cho những chi tiết hình dạng đơn giản, yêu cầu thiết bị thí nghiệm chuẩn, độ chính xác cao.

b) Nhóm các phương pháp vật lý (các phương pháp không phá hủy) dựa trên sự thay đổi một số tính chất vật lý của mẫu đo có USD khi nó tương tác với một trường vật lý, nhóm này bao gồm các phương pháp [66, 69]:

+ **Siêu âm**: Sử dụng sóng siêu âm để chiếu vào khu vực có USD trên mẫu để chụp ảnh. Việc phân tích, đánh giá hình ảnh thu được cho phép đưa ra kết luận về sự phân bố USD. Ưu điểm: rất nhanh, chi phí thấp, linh hoạt. Nhược điểm: độ phân giải hạn chế, phải có mẫu chuẩn so sánh cho từng loại vật liệu và chỉ đo được trường phân bố USD mà không đo được giá trị của USD.

+ **Nhiều xạ tia X**: Sử dụng chùm tia X để chiếu vào khu vực có USD trên bề mặt chi tiết, các góc nhiễu xạ của chùm tia được thu thập để phân tích

giá trị USD. Ưu điểm: phổ biến rộng rãi, áp dụng cho nhiều loại vật liệu, hệ thống linh hoạt, xác định được ứng suất dư thô đại và vi mô. Nhược điểm: phải có các phép đo chuẩn, yêu cầu thiết bị thí nghiệm chuẩn.

+ **Nhiều xạ Notron:** Phương pháp này cơ bản cũng tương tự như phương pháp sử dụng tia X nhưng sử dụng chùm tia notron. Ưu điểm: cho độ sâu thâm nhập và chính xác cao, xác định được ứng suất theo ba chiều, xác định được ứng suất dư thô đại và vi mô. Nhược điểm: chỉ dùng cho nghiên cứu chuyên sâu, thiết bị thí nghiệm chuẩn.

+ **Synchrotron:** Phương pháp này cũng giống như nhiều xạ tia X, nhưng cho độ sâu thâm nhập cao hơn và độ chính xác hơn X-ray, cho kết quả nhanh, xác định ứng suất dư thô đại và vi mô. Nhược điểm: chỉ dùng cho nghiên cứu chuyên sâu, yêu cầu thiết bị thí nghiệm chuẩn.

+ **Phương pháp từ (Nam châm):** Sử dụng đầu dò để thu thập phân bố từ trên chi tiết có USD, bằng việc so sánh hình ảnh phân bố từ trường thu được với mẫu chuẩn có thể xác định được trường USD. Ưu điểm: rất nhanh, áp dụng cho nhiều loại vật liệu từ tính, linh hoạt. Nhược điểm: chỉ có thể áp dụng cho vật liệu nhiễm từ là phải có mẫu chuẩn so sánh cho từng vật liệu.

1.1.3. Ảnh hưởng của ứng suất dư đến độ bền của kết cấu.

Sự xuất hiện của USD trong các công nghệ hàn, đúc gây ra nhiều ảnh hưởng tiêu cực đối với cả việc hình thành và độ bền của kết cấu. Cụ thể:

- Sự xuất hiện USD có thể gây ra các hiện tượng cong vênh (Hình 1. 1) hoặc nứt, vỡ (Hình 1. 2) đối với chi tiết và kết cấu, khiến chi tiết và kết cấu không thể được hình thành, hoặc gây khó khăn cho những nguyên công kế tiếp [29].



Hình 1. 1: Sự cong vênh của thang máy bay sau hàn [29]



Hình 1. 2: Hiện tượng cong vênh của phôi đúc sau gia công

Trong nhiều trường hợp, USD xuất hiện trong quá trình hình thành chi tiết, kết cấu (nhất là ở giai đoạn làm nguội) có thể vượt quá giới hạn bền của vật liệu và gây ra nứt vỡ [29, 55] (Hình 1. 3).



Hình 1. 3: Sự nứt trong thỏi nhôm đúc do ứng suất dư [29]

- Theo quan điểm vĩ mô, USD là trạng thái dự ứng lực trong vật liệu. Đối với vật liệu dẻo, USD có ảnh hưởng rõ rệt đến các chỉ tiêu bền như giới hạn đàn hồi. Kết quả thí nghiệm cho thấy giới hạn tỉ lệ có thể giảm đến 40% so với trạng thái không có USD [37].

- USD có ảnh hưởng lớn đến giới hạn mỏi và độ bền mỏi của chi tiết. Trong thí nghiệm với mẫu thép AISI 4340 được mài bằng đá mài với các chế độ khác nhau (để tạo mức USD khác nhau), kết quả thử độ bền mỏi cho thấy mối tương quan gần như tuyến tính giữa độ bền mỏi với USD có trong vùng quan sát [55]. Sự ảnh hưởng của USD đến giới hạn mỏi cho thấy USD nén làm tăng giới hạn mỏi, trong khi USD kéo làm giảm đáng kể giới hạn mỏi của vật liệu. Thí dụ về ứng dụng hiện tượng này là áp dụng công nghệ phun bi, hay thậm chí các bon để tạo lớp USD nén trên bề mặt, nhờ đó làm tăng giới hạn mỏi.

- USD cũng ảnh hưởng đến tính ổn định chống ăn mòn của vật liệu. Một mẫu kim loại chịu USD được đặt vào môi trường ăn mòn, sau một khoảng thời gian nhất định trên bề mặt của mẫu xuất hiện các vết ăn mòn. Các vết nứt có thể xuất hiện trong mẫu vật liệu do hiện tượng ăn mòn dưới ứng suất. Ăn mòn khi có USD là một trong các nguyên nhân chủ yếu gây ra phá hủy trong các nhà máy hóa học, trong các công trình biển do một số chi tiết vẫn còn tồn tại USD khi đưa vào sử dụng.

1.2. Phương pháp khử ứng suất dư.

Khử USD là biện pháp kích thích nhằm làm giảm USD tồn tại trong vật thể. Hiện nay, người ta đang áp dụng một số phương pháp khử USD hiệu quả như: phương pháp nhiệt, phương pháp cơ học.

1.2.1. Các phương pháp sử dụng nhiệt.

1.2.1.1. Nhiệt luyện khử ứng suất dư.

Nhiệt luyện khử U_{SD} là dùng lò nhiệt để đưa nhiệt độ của chi tiết, kết cấu lên đến một mức nào đó, giữ trong một thời gian rồi để nguội tự nhiên [14], lò nhiệt luyện được thể hiện trên Hình 1. 4.

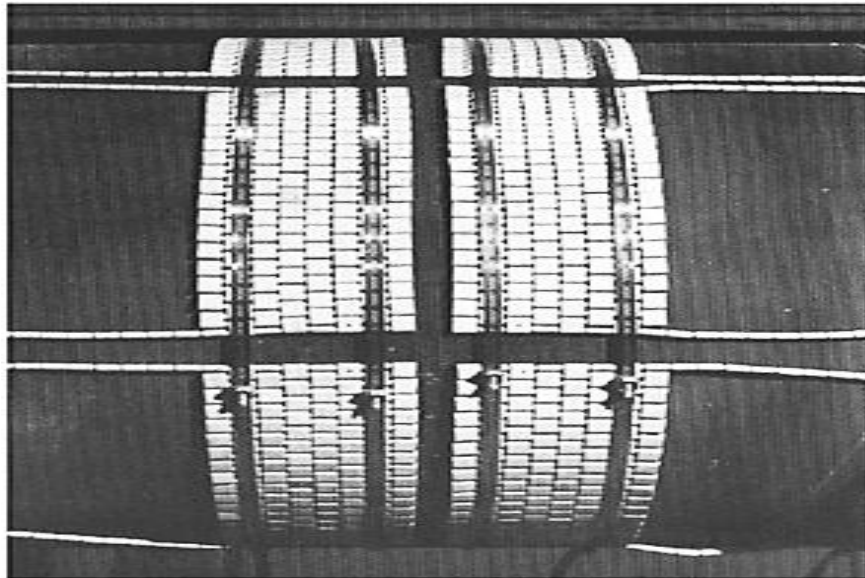


Hình 1. 4: Lò nung nhiệt luyện [14]

Với các chi tiết, kết cấu có kích thước nhỏ, có thể ủ để khử U_{SD} trong các lò nhiệt luyện. Với các kết cấu lớn, có thể áp dụng phương pháp nung nóng trở lại khu vực mối hàn và xung quanh mối hàn nhằm phân bố lại các nguyên tử về vị trí cân bằng, U_{SD} giảm dần và khử dần các biến dạng làm cho hình dạng của kết cấu đạt yêu cầu theo thiết kế. Tuy nhiên việc chọn khu vực nung và chế độ nung không hợp lý có thể lại làm cho biến dạng thêm phức tạp, U_{SD} lại tăng lên. Hơn nữa việc kiểm soát nhiệt độ của quá trình gia nhiệt cũng đóng vai trò rất quan trọng. Ưu điểm của phương pháp nhiệt luyện là độ giảm U_{SD} đạt được lớn, nhưng nhược điểm là chỉ phù hợp với chi tiết có kích thước nhỏ và làm giảm cơ tính của vật liệu.

1.2.1.2. Nung nóng cục bộ

Dùng các tấm gốm nhỏ có điện trở liên kết với nhau tạo thành phần tử nhiệt, bằng cách nối một chuỗi các phần tử như vậy liên tiếp, có thể tạo ra tấm nung rất linh hoạt dùng để quấn xung quanh các bề mặt hình trụ (Hình 1. 5). Chi tiết được nung đến nhiệt độ xác định, giữ nhiệt trong một khoảng thời gian nhất định, sau đó làm nguội. Cả quá trình nung nóng và làm nguội đều phải đảm bảo một gradient nhiệt độ nhất định, chẳng hạn tốc độ $100-200^{\circ}\text{C/h}$ trên chiều dày không quá 25mm và tốc độ này được chọn giảm dần khi chiều dày của chi tiết hoặc kết cấu tăng lên.

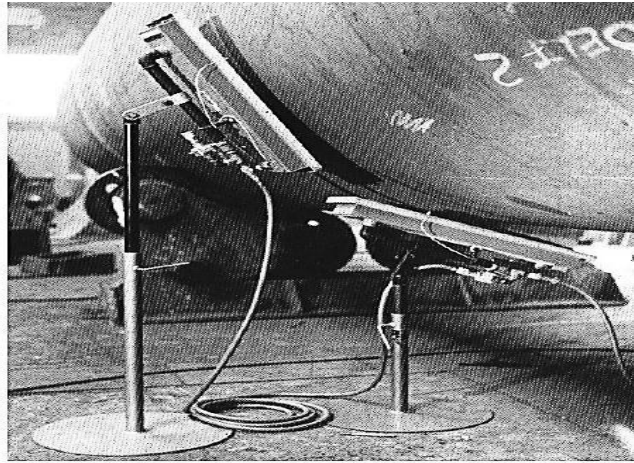


Hình 1. 5: Nung nóng cục bộ bằng tấm nung Ceramic [14]

Phương pháp nung nóng cục bộ thường được áp dụng để khử USD cho các mối hàn. Nhiệt độ nung nóng cục bộ thường không quá 250°C và phải trải rộng ít nhất 75-80 mm về hai phía của đường hàn. Ưu điểm của phương pháp là xử lý được các kết cấu lớn được chế tạo bằng công nghệ hàn. Nhược điểm căn bản của phương pháp này là có thể làm tăng USD do nhiệt.

1.2.1.3. Nung nóng bằng bức xạ

Dùng bức xạ cực tím (được tạo thành khi đốt cháy phân tử gồm bằng khí) hoặc sử dụng đèn Halogen wolfram chiếu vào khu vực cần xử lý [57], (Hình 1. 6).



Hình 1. 6: Nung nóng bằng bức xạ để duy trì nhiệt độ giữa hai lần hàn [57]

Hiệu quả của phương pháp phụ thuộc vào khả năng bức xạ và hấp thụ của chi tiết, khả năng này lại phụ thuộc vào bản chất vật liệu và tính chất bề mặt của chi tiết. Phương pháp này có khả năng điều chỉnh tốt, nó có thể sử dụng kết hợp với hệ phản hồi để ổn định nhiệt độ nung. Ưu điểm là nguồn bức xạ có thể bao quanh chi tiết với hình dạng phức tạp và có thể điều chỉnh thích hợp các thay đổi cục bộ của bề nhiệt. Nó đặc biệt thích hợp cho công việc nung nóng trước khi hàn và giá vận hành khá rẻ.

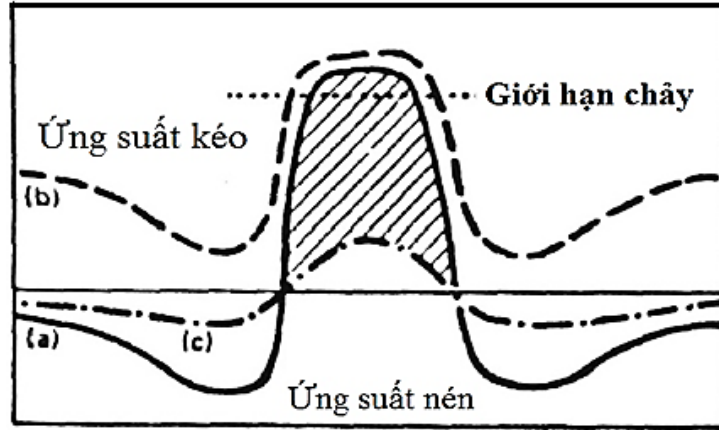
1.2.2. Khử ứng suất dư bằng các phương pháp cơ học.

Các phương pháp cơ học được áp dụng để khử USD hiện hay bao gồm: đặt tải gia cường, phun bi, già hóa tự nhiên và rung động.

1.2.2.1. Đặt tải tăng cường.

Kỹ thuật đặt tải tăng cường có bản chất là sự kết hợp tải do áp lực bên ngoài với USD có trong chi tiết. Tải trọng kết hợp sẽ tạo ra ứng suất vượt quá giới hạn

chảy của vật liệu, gây chảy dẻo cục bộ dẫn đến giảm USD. Hình 1. 7 là đồ thị thể hiện quá trình tích thoát ứng suất dư bằng cách đặt tải gia cường [50].



Hình 1. 7: Tích thoát ứng suất dư bằng cách đặt tải trọng kéo[50]

(a) Trường ứng suất dư ban đầu; (b) Ứng suất kéo đặt vào gây biến dạng dẻo trong vùng ứng suất dư cao và biến đổi ứng suất đàn hồi thành ứng suất chảy; (c) Trường ứng suất dư nhỏ sau khi bỏ tải trọng kéo; vùng gạch chéo là vùng có biến đổi biến dạng đàn hồi thành biến dạng dẻo.

Hầu hết các chi tiết quan trọng đều được đặt tải tăng cường với mục đích thử nghiệm trước khi đưa vào sử dụng chính thức nhằm đảm bảo sự tin cậy trong quá trình vận hành. Việc đặt tải tăng cường làm biến đổi USD đàn hồi thành USD dẻo thông qua quá trình biến dạng dẻo cục bộ và sự cất tải sau đó cho phép nhận được USD nhỏ hơn USD ở trạng thái ban đầu. Nhược điểm của phương pháp là chỉ áp dụng cho hệ thống chịu áp lực dạng kín, hay các chi tiết đơn giản có USD lớn không chịu được biến dạng dẻo bổ sung. Khi chi tiết có USD quá lớn có thể yêu cầu phải có xử lý nhiệt trước để ngăn ngừa hiện tượng biến giòn.

1.2.2.2. Phun bi

Phun bi là sử dụng dòng hạt chuyển động với vận tốc lớn bắn lên bề mặt

cần xử lý của chi tiết. Mặc dù có thể tồn tại ở nhiều hình dạng khác nhau nhưng các hạt vẫn được gọi chung là bi [56]. Hình 1. 8 thể hiện quá trình phun bi xử lý bề mặt răng của bánh răng.



Hình 1. 8: Phun bi xử lý bề mặt [56]

Phun bi có thể được áp dụng để giảm mức USD kéo trong chi tiết ngay sau hàn, hoặc để hạn chế biến dạng. Nó được sử dụng chủ yếu để cải thiện độ bền mỏi của mối hàn nhờ việc đặt trường ứng suất nén ở vùng gần bề mối hàn. Việc phun bi với tốc độ và thời gian quá dài có thể sẽ tạo ra các vết nứt nhỏ, song trong thực tiễn sản xuất chưa quan sát thấy tác động tiêu cực của hiện tượng này đến độ bền mỏi của chi tiết. Do có rất nhiều dạng phá hủy bắt đầu xảy ra trên bề mặt chi tiết, nên việc hình thành ứng suất nén trên bề mặt nhờ quá trình phun bi có thể làm tăng đáng kể tuổi thọ của chi tiết.

Ngoài phun bi còn có một số dạng xử lý bề mặt khác có thể áp dụng: phun cát, lăn ép, hay búa kim,... Tuy nhiên cần lưu ý rằng đây chỉ là các dạng xử lý trên bề mặt và chỉ phát huy tác dụng đối với mối hàn. Phun bi kết hợp với ủ hay rung sau hàn cho kết quả rất tốt về giảm USD, về sự phân bố ứng suất và sự ổn định kích thước. Phương pháp này đặc biệt có lợi đối với các chi tiết gia công đòi hỏi độ chính xác cao như bệ và giàn trong công nghiệp ô tô và máy bay.

1.2.2.3. Khử ứng suất dư bằng già hóa tự nhiên

Già hóa tự nhiên thực chất là để phôi, chi tiết và kết cấu ở ngoài trời trong khoảng thời gian dài từ 6 đến 12 tháng trước khi thực hiện bước gia công tiếp theo. Phương pháp này thường được áp dụng cho các chi tiết cỡ lớn với kết cấu phức tạp, được tạo ra từ các phân xưởng đúc [56].

Sự thay đổi nhiệt độ môi trường khiến chi tiết chịu các quá trình co, kéo trong nhiều chu kỳ. Chính quá trình co, kéo đó đã gây ra biến dạng vi mô, nhờ đó làm giảm USD. Nhược điểm của phương pháp này là đòi hỏi quá nhiều thời gian cho quá trình khử USD.

1.2.2.4. Khử ứng suất dư bằng phương pháp rung động

Rung động khử ứng suất dư (VSR) là phương pháp dùng dao động cưỡng bức để kích thích chi tiết dao động và sinh ra biến dạng. Dưới tác dụng của năng lượng dao động, các nguyên tử trong vật liệu được sắp xếp lại để trở về vị trí cân bằng hơn dẫn đến giảm ứng suất dư.

Quá trình rung có thể được tiến hành trong hoặc ngoài vùng cộng hưởng. Đặc biệt, đối với công nghệ hàn, phương pháp rung còn có thể tiến hành ngay trong quá trình hàn. Đối với những chi tiết mỏng có thể dùng sóng siêu âm để tạo ra dao động. Nhìn chung, để quá trình VSR đạt hiệu quả cao, nhất là đối với kết cấu có kích thước, khối lượng lớn thì VSR trong vùng cộng hưởng là phù hợp.

1.3. Khử ứng suất dư bằng phương pháp rung.

1.3.1. Quá trình phát triển công nghệ rung khử ứng suất dư.

Những năm đầu của thế kỷ 20, tại nước Đức, các kỹ sư đã tình cờ phát hiện ra hiện tượng các kết cấu lớn được chế tạo bằng hàn, đúc khi được vận chuyển bằng xe (hoặc tàu hỏa) cho độ ổn định kích thước lớn hơn trong quá

trình gia công chi tiết sau đó. Từ sau đó, vận chuyển chi tiết bằng xe trở thành quy trình chuẩn để có độ chính xác lớn trong chế tạo.

Đến năm 1940, các nhà khoa học cho rằng nguyên nhân chính làm cho chi tiết chế tạo có độ chính xác cao hơn sau khi được vận chuyển bằng xe là do sự giảm USD khi phôi bị uốn cong. Để thử nghiệm kiểm chứng, họ đã chủ động tạo ra sự uốn cong phôi theo nhiều cách khác nhau, trong đó có sử dụng dao động, kết quả của các thử nghiệm đạt được tương tự như khi vận chuyển chi tiết bằng xe. Năm 1943, trong công trình đầu tiên về tạo rung cho bộ máy và các kết cấu hàn trước khi phay phẳng, McGoldric và Saunders nhận thấy có độ chính xác cao về kích thước sau khi phay phẳng bề mặt, đồng thời có độ ổn định kích thước hơn cho kết cấu hàn [60]. Với kết quả đó, hai tác giả đã đặt nền móng và đánh dấu một bước tiến quan trọng trong việc khử ứng suất dư bằng rung động.

Qua những kết quả đã được công bố về lợi ích của công nghệ VSR, trong những năm từ 1971 đến 1990, nhiều thiết bị VSR được phát minh với những cải tiến ngày càng gọn nhẹ hơn, áp dụng hiệu quả hơn trong chế tạo và sản xuất [43, 47, 65]. Trong các hệ thống thiết bị VSR đó, về cơ bản có 4 bộ phận chính bao gồm: đầu tạo rung động, cảm biến gia tốc rung, giá kê đàn hồi và bộ điều khiển trung tâm.

Ngày càng có nhiều ngành công nghiệp chế tạo máy chính xác sử dụng VSR, từ các ngành như công nghiệp chế tạo ô tô, chế tạo vũ khí đến các ngành công nghiệp khai khoáng mỏ,... Nhận thấy nhu cầu lớn đến từ nhiều ngành trong công nghiệp chế tạo máy, nhiều hãng sản xuất thiết bị VSR cho mục đích thương mại, điển hình như: BONAL, SRE, VSR của Mỹ và HB của Trung Quốc. Theo báo cáo của các hãng, hàng nghìn công ty chế tạo máy thuộc nhiều lĩnh vực là đối tác mua hoặc thuê thiết bị, điển hình như: NASA, Boeing, United States Army, General Motors, Dae Woo, Canon Ltd...[34].

Một số hình ảnh ví dụ về ứng dụng công nghệ VSR được thể hiện trong các Hình 1. 9 và Hình 1. 10 [34, 59, 64].



a) Kết cấu máy bay



b) Kết cấu ô tô



c) Chi tiết nhỏ



d) Kết cấu đúc



e) Kết cấu hàn kích thước lớn



f) Kết cấu đúc khối lượng lớn

Hình 1. 9: Kết cấu hàn được khử ứng suất dư bằng rung lắc

Tại Việt Nam, nhận thấy nhu cầu lớn về VSR, năm 2015 tác giả Nguyễn Văn Dương [3] đã thực hiện thành công đề tài cấp nhà nước về thiết kế chế

tạo thiết bị VSR cho chi tiết có kích thước và khối lượng lớn, Hình 1. 10 thể hiện quá trình VSR tại Việt Nam. Từ đó tới nay, thiết bị VSR đã và đang phục vụ sản xuất cho rất nhiều đơn vị trong nước.



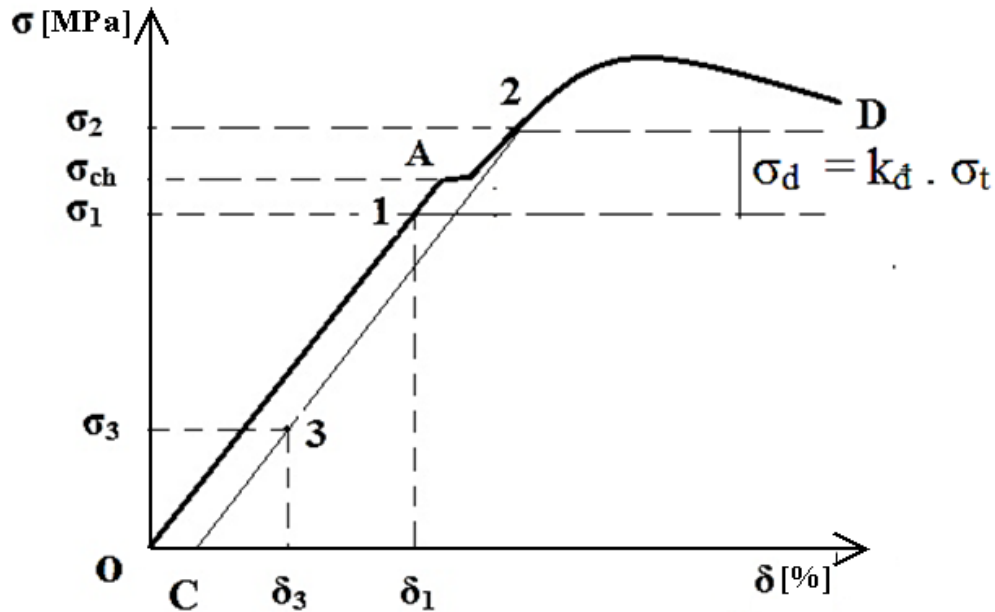
Hình 1. 10: Rung khử ứng suất dư tại Việt Nam

Với việc ứng dụng rộng rãi công nghệ VSR, nhiều nước đã có các tiêu chuẩn về xác định USD và đánh giá quá trình VSR. Tiêu biểu là tiêu chuẩn Mỹ ASTM E837: đo USD bằng khoan lỗ [12], hoặc tiêu chuẩn Trung Quốc GB T25731-2010 về đánh giá hiệu quả VSR [26].

1.3.2. Nguyên lý tích thoát ứng suất dư nhờ tải trọng.

Bản chất cơ học của công nghệ VSR được giải thích trong nhiều công trình nghiên cứu, trong đó dựa trên hiện tượng tích thoát USD khi đặt tải tăng cường và tích thoát USD dưới tải trọng chu kỳ [11, 18, 20, 68]. Theo quan điểm này: dưới tác động của năng lượng dao động, các phần tử vi mô trong vật thể bị biến dạng dẻo cục bộ dẫn đến quá trình tích thoát USD. Hình 1. 11 là đồ thị dùng để giải thích nguyên lý cơ học của VSR. Thông thường trong các quá trình gia nhiệt (đúc, hàn), USD được hình thành mà chưa gây ra biến dạng dẻo. Do vậy, trạng thái ứng suất - biến dạng dư tại các phần của chi tiết tương ứng với các điểm trong miền đàn hồi OA của đường cong ứng suất - biến dạng, chẳng hạn điểm 1 (Hình 1. 11). Khi có ngoại lực tuần hoàn đặt vào

chi tiết, ứng suất tại điểm quan sát tăng lên tương ứng với điểm 2 trên biểu đồ ứng suất - biến dạng:



Hình 1. 11: Nguyên lý cơ học của công nghệ rung khử ứng suất dư [11]

$$\sigma_2 = \sigma_1 + k_d \cdot \sigma_t \quad (1.1)$$

trong đó σ_1 là ứng suất dư ban đầu; σ_2 là ứng suất sau khi đặt tải trọng động; σ_t là ứng suất tĩnh do ngoại lực gây ra tại điểm quan sát; k_d là hệ số tải trọng động; $k_d \sigma_t$ là ứng suất động.

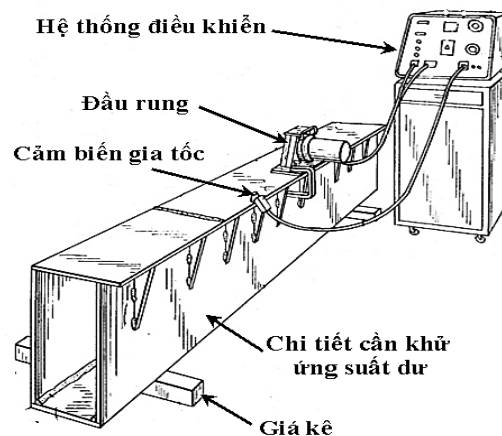
Ứng suất σ_2 cần vượt quá giới hạn chảy σ_{ch} của vật liệu và gây ra biến dạng dẻo, trạng thái ứng suất biến dạng bây giờ tương ứng với điểm 2. Khi cất tải, ứng suất - biến dạng tại vị trí này sẽ giảm theo đường 2C song song với đường đàn hồi OA. Nếu không có sự ràng buộc với các phần khác của vật liệu trong vật thể, trạng thái ứng suất - biến dạng sẽ tương ứng với điểm C, tức là USD sẽ giảm về 0 và sẽ chỉ còn lại biến dạng dư OC. Tuy nhiên, do có sự ràng buộc với các phần khác của toàn vật thể nên trạng thái ứng suất - biến

dạng bây giờ tương ứng với điểm 3 (Hình 1. 11), kết quả là ứng suất và biến dạng đều giảm về các giá trị σ_3 và δ_3 tương ứng.

Công thức (1.1) cho thấy, khi rung ở tần số cộng hưởng hệ số k_d có thể khá lớn nên ứng suất động σ_d tạo ra đủ lớn, có thể cộng tác dụng với USD sẵn có sẽ gây ra biến dạng dẻo và dẫn đến giảm USD. Điều này cũng giải thích chỉ cần lực tác dụng nhỏ khi rung ở tần số cộng hưởng cũng gây ra giảm USD. Hiện nay còn có thêm quan điểm cho rằng dưới tác dụng của tải trọng tuần hoàn, giới hạn chảy của vật liệu giảm do hiệu ứng Bauschinger [74], vì vậy quá trình biến dạng dẻo vi mô dễ xảy ra khi VSR.

1.3.3. Thiết bị, nguyên lý hoạt động của hệ thống rung khử ứng suất dư.

Sơ đồ bố trí thiết bị của hệ thống VSR cho chi tiết, kết cấu được thể hiện như Hình 1. 12. Các thiết bị trong hệ thống này bao gồm: Đầu rung, cảm biến gia tốc, giá kê (gối đỡ đàn hồi) và hệ thống điều khiển.



Hình 1. 12: Hệ thống thiết bị được lắp đặt để rung khử ứng suất dư [43]

Nguyên lý hoạt động của hệ thống VSR như sau:

Chi tiết, kết cấu cần khử USD được kê trên các gối đỡ đàn hồi, đảm bảo cho chi tiết, kết cấu dao động gần với dao động tự do, đầu rung và cảm biến gia tốc được gắn vào chi tiết, kết cấu. Hệ thống điều khiển tạo dao động cho

đầu rung với tần số tăng dần (quét tần số), tín hiệu về tần số dao động của chi tiết, kết cấu được cảm biến gia tốc thu và phản hồi về cho hệ thống điều khiển, do vậy hệ thống điều khiển sẽ xác định được tần số cộng hưởng của chi tiết, kết cấu. Ứng với mỗi chi tiết, kết cấu xác định, thì biên độ VSR được tính toán xác định từ trước và tiến hành điều chỉnh quả văng lệch tâm để đầu rung tạo biên độ dao động tương ứng. Hệ thống điều khiển sẽ điều khiển đầu rung dao động với tần số cộng hưởng đã được xác định, thời gian rung trong khoảng vài phút. Nếu kết cấu lớn có thể tiến hành rung tại một vài vị trí, kết cấu nhỏ thì sẽ được gắn trên bàn rung.

Để đạt được hiệu quả cao, việc VSR cho chi tiết tại tần số dao động riêng cần phải tuân theo một trình tự thống nhất đã được kiểm chứng qua nhiều nghiên cứu của các hãng sản xuất thiết bị. Trong tài liệu [45], Stefan đã đưa ra các bước thực hiện VSR. Sau khi gá đặt hệ thống VSR như mô hình thể hiện trên Hình 1. 12, qui trình VSR được tiến hành gồm 4 bước:

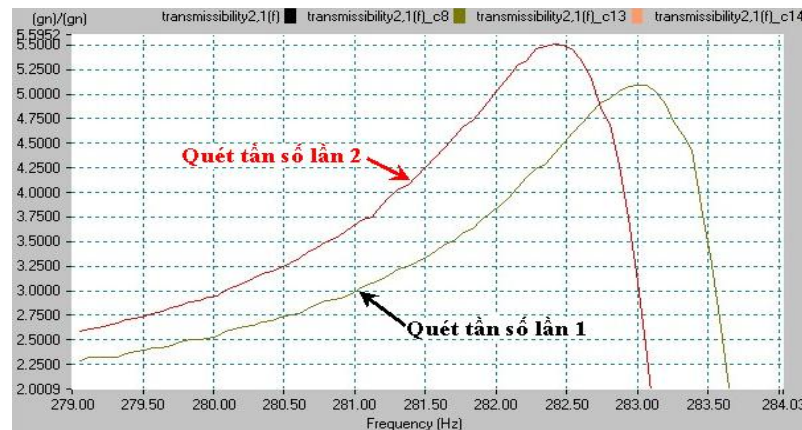
- Bước 1. Xác định tần số dao động riêng: cho chi tiết, kết cấu rung động với tần số tăng dần, quét tìm tần số cộng hưởng của chi tiết, kết cấu (cũng chính là tần số dao động riêng). Hình 1. 13 minh họa tần số dao động riêng đầu tiên của chi tiết, kết cấu.



Hình 1. 13: Tần số cộng hưởng của chi tiết, kết cấu

- Bước 2. Rung khử ứng suất dư: tiến hành VSR cho chi tiết, kết cấu tại tần số dao động riêng, biên độ dao động được tính toán sao cho ứng suất tổng cộng vượt quá giới hạn chảy của vật liệu làm chi tiết, thời gian VSR phụ thuộc vào từng loại kết cấu và giá trị USD trong chi tiết. Theo tài liệu [45], để đạt được hiệu quả cao thì tần số VSR ở ngay đỉnh cộng hưởng, minh họa trên Hình 1. 13. Thời gian VSR có thể một vài chu kỳ cho tới hàng phút, thậm chí hàng chục phút, tuy nhiên nhiều nghiên cứu chỉ ra hiệu quả của VSR đạt được chỉ sau một vài chu kỳ đầu, hơn nữa việc VSR với thời gian dài có thể sẽ làm giảm tuổi thọ của chi tiết, kết cấu.

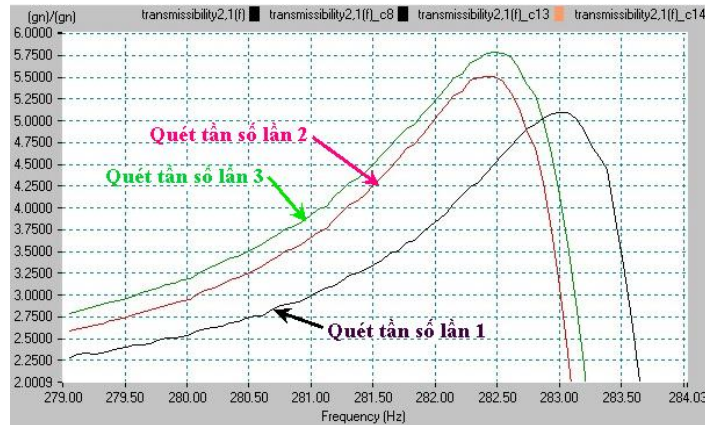
- Bước 3. Kiểm tra ứng suất dư: sau khi VSR tần số cộng hưởng của chi tiết, kết cấu bị thay đổi (thường là giảm). Quét lại tần số để tìm tần cộng hưởng của chi tiết (quét tần số lần 2), rồi so với tần số cộng hưởng quét lần 1. Nếu tần số cộng hưởng thay đổi so với lần thứ nhất thì sự giảm USD được ghi nhận. Hình 1. 14 minh họa tần số cộng hưởng thay đổi sau khi được VSR so với trước khi rung.



Hình 1. 14: Sự thay đổi tần số cộng hưởng sau rung khử ứng suất dư

- Bước 4. Đánh giá kết quả VSR: tiến hành rung khử để đảm bảo sự giảm ứng suất đã xảy ra, VSR được tiến hành tại tần số cộng hưởng mới, sau đó kiểm tra tần số cộng hưởng của chi tiết, kết cấu (quét tần số lần 3), nếu tần

số dao động riêng của chi tiết, kết cấu không thay đổi so với bước 3 thì quá trình VSR đã được hoàn thành, nếu tần số dao động riêng của chi tiết còn thay đổi thì tiến hành lại bước 1. Hình 1. 15 minh họa tần số cộng hưởng của chi tiết, kết cấu trong 3 lần quét.



Hình 1. 15: Tần số cộng hưởng của chi tiết trong các lần quét

Từ qui trình VSR trên, dễ dàng nhận thấy những tham số công nghệ cần phải được xác định: biên độ, tần số và thời gian rung khử. Nếu thực hiện VSR tại tần số cộng hưởng của chi tiết, kết cấu thì biên độ và thời gian rung khử là hai tham số cần phải được quan tâm nghiên cứu.

1.3.4. Ưu nhược điểm của công nghệ rung khử ứng suất dư.

Việc sử dụng phương pháp VSR tăng cao trong khoảng hơn ba thập kỷ gần đây, điều này là do một số ưu điểm sau [28, 59]:

- Khử ứng suất dư bằng nhiệt trong thực tế không hiệu quả trên một số dạng chi tiết, kết cấu đặc biệt như có sự khác biệt lớn về độ dày thành của một chi tiết, kết cấu hay đặc điểm hình dạng của nó không cho phép xử lý khử ứng suất dư bằng nhiệt.
- VSR trước và sau gia công làm tăng độ ổn định kích thước.

- VSR cho các chi tiết hàn từ hợp kim, thép không gỉ austenit và tất cả các vật liệu hợp kim màu có độ ổn định kích thước hiệu quả hơn với so với xử lý nhiệt sau hàn.

- Việc sử dụng gia tăng các loại thép các bon thấp, thép bền cao, xử lý nhiệt sau khi hàn các loại thép này gây rủi ro lớn, có thể làm giảm độ bền hoặc độ dai. Các mác thép này cũng phải chịu rủi ro bị nứt, gãy tăng lên khi sử dụng biện pháp xử lý nhiệt sau hàn.

- Thời gian tiến hành xử lý khử USD bằng rung động cho một chi tiết là rất nhỏ, chỉ bằng khoảng 1/30 so với thời gian yêu cầu khi khử USD cho chi tiết tương tự bằng nhiệt. VSR có khả năng áp dụng cho chi tiết có khối lượng và kích thước bất kỳ trong khi xử lý bằng nhiệt có giá thành cao và khó thực hiện.

- Đáp ứng tốt nhu cầu của khách hàng nhờ giảm thiểu thời gian và giá thành như giá thành vận chuyển được loại trừ khi ứng dụng phương pháp VSR.

- Không gây ô nhiễm môi trường như các phương pháp khử USD bằng nhiệt do không sử dụng nhiên liệu.

Vấn đề hạn chế sự phát triển công nghệ VSR trong sản xuất là việc chứng tỏ hiệu quả rung khử USD. Hiệu quả khử USD thường được đánh giá bằng mức độ suy giảm USD trước và sau khi rung, các kết quả đánh giá theo các nghiên cứu khác nhau là rất khác nhau. Kết quả tốt nhất được công bố trong các công trình nghiên cứu là khoảng 50-70%.

1.4. Một số kết quả nghiên cứu đã công bố về rung khử ứng suất dư.

1.4.1. Nghiên cứu về khả năng giảm ứng suất dư.

USD trong kết cấu gây ra ảnh hưởng xấu đến đặc tính cơ học của nó. Để cải thiện cho kết cấu làm việc có độ tin cậy thì USD có hại cần phải được loại

bỏ, đặc biệt là USD kéo. Bởi vậy, một số nhà nghiên cứu tìm cách kiểm soát USD trong quá trình hàn và phương pháp xử lý sau hàn. Trong vài chục năm gần đây, phương pháp dùng dao động để giảm USD nổi lên như một giải pháp thay thế các phương pháp nhiệt và được nhiều nhà khoa học trong nước và quốc tế quan tâm, dưới đây là một số nghiên cứu tiêu biểu về chủ đề này:

Năm 1943, McGoldrick và Saunders [60] là những người đầu tiên nghiên cứu về phương pháp VSR. Các tác giả đã nghiên cứu khả năng giảm USD và sự ổn định kích thước của kết cấu đúc và kết cấu hàn với kích thước lớn sau khi được VSR. Qua nghiên cứu, các tác giả đã đi đến kết luận rằng USD giảm trong thép đúc và trong mối hàn bằng rung động có lợi hơn các phương pháp khác như các phương pháp nhiệt bởi khả năng ổn định kích thước của kết cấu hàn tăng rõ rệt. Họ cũng đã ghi nhận phương pháp dao động cộng hưởng có thể giảm USD tốt hơn đối với mối hàn.

Năm 1980, Dawson và Moffar [59] đã nghiên cứu việc giảm USD bằng dao động cho mẫu dạng dầm làm bằng các loại vật liệu thép cán nóng, thép kéo nguội và hợp kim nhôm. Quá trình VSR được tiến hành trong vùng tần số chứa tần số cộng hưởng của mẫu. Các tác giả đã sử dụng tem để đo biến dạng bề mặt nhằm xác định độ giảm USD ở bề mặt. Từ kết quả nghiên cứu các tác giả chỉ ra rằng phương pháp dùng dao động có khả năng làm giảm USD bề mặt gần như hoàn toàn (khoảng 90%) cho các kết cấu làm bằng thép nhẹ cán nóng, thép nhẹ được kéo nguội và hợp kim nhôm. Sự giảm USD được thể hiện ở sự thay đổi biến dạng vĩnh viễn trên bề mặt và do đó có thể sử dụng máy đo biến dạng để theo dõi tiến trình giảm USD. Nhóm tác giả cũng khẳng định rằng để có thể khử USD thì biên độ nguồn rung động phải sinh ra biến dạng vượt quá giới hạn đàn hồi, mức biến dạng nhỏ hơn không khử được USD, và mức độ giảm ứng suất dư có quan hệ tuyến tính với sự gia tăng biên độ biến dạng. Tần số rung ít ảnh hưởng đến việc giảm USD.

Năm 1995, Walker và cộng sự [15] tiến hành rung động mẫu bằng thép hợp kim thấp EN3b, USD được tạo bằng phương pháp cán có giá trị gần bằng giới hạn chảy của vật liệu. Tác giả tiến hành VSR mẫu tại tần số 100Hz. Kết quả cho thấy USD giảm tới 40%. Ngoài ra các tác giả cũng khẳng định để giảm USD bằng phương pháp dao động thì biên độ rung khử phải tạo ra ứng suất trên mẫu vượt quá giới hạn chảy của vật liệu.

Năm 2004, Rao [21] sau khi kiểm tra tần số của kết cấu thanh ray đường tàu trước và sau VSR thì đi đến kết luận rằng sau dao động đỉnh cộng hưởng tăng còn tần số cộng hưởng giảm. Sự giảm tần số cộng hưởng sau dao động cũng là tín hiệu ghi nhận USD đã được khử.

Năm 2005, Yang và cộng sự [71] sử dụng phương pháp số để mô phỏng sự thay đổi USD của kết cấu hàn và quá trình giảm USD nhờ rung động sau khi hàn. Mô hình mẫu là tấm có kích thước $290 \times 76,2 \times 6,35$ cm làm từ thép các bon 0,18%. Cả rung động cộng hưởng và không cộng hưởng đều có thể làm giảm USD trong kết cấu hàn nhờ tạo ra biến dạng dẻo xung quanh khu vực hàn. Đối với trường hợp rung không cộng hưởng, việc giảm USD nhiều hay ít phụ thuộc vào biên độ rung. Đối với rung cộng hưởng, tần số rung phải gần với tần số riêng của kết cấu, khi đó biên độ rung nhỏ vẫn có thể được khuếch đại trong quá trình rung. Thời gian rung không ảnh hưởng lớn đến việc giảm USD. Khi giảm USD bằng rung không cộng hưởng, hầu hết ứng suất dư giảm ngay trong chu kỳ tải đầu tiên. Để giảm ứng suất dư bằng cộng hưởng, cần nhiều chu kỳ tải hơn để khuếch đại tải. Trong khi đó biên độ rung động càng lớn, thì USD được giảm càng nhiều.

Năm 2007, Xu và cộng sự [42] đã nghiên cứu phương pháp giảm USD bằng rung ngay trong quá trình hàn các ống. Ống được chế tạo bằng vật liệu thép A105 và USD được đo bằng phương pháp khoan lỗ. Các tác giả đã so

sánh giữa hàn có rung động với hàn hồ quang thông thường và đi đến kết luận rằng USD bề mặt và biến dạng hướng tâm giảm đáng kể (có thể giảm đến 50%). Tuy nhiên, ứng suất và biến dạng theo hướng dọc trục của ống vẫn còn lớn đáng kể.

Năm 2013, Shalvandi và cộng sự [51] đã nghiên cứu giảm USD của mẫu bằng sóng siêu âm. Mẫu nhỏ được chế tạo bằng thép ASTM A193. Để so sánh, các tác giả đã làm thí nghiệm sử dụng cả hai phương pháp giảm USD bằng nhiệt và bằng sóng siêu âm. Kết quả của nghiên cứu đã khẳng định rằng giảm USD bằng phương pháp siêu âm cho hiệu quả tương đương với phương pháp nhiệt. Ưu điểm nổi bật của phương pháp siêu âm là có thể ứng dụng tốt cho các chi tiết nhỏ, mỏng.

Năm 2017, nhóm tác giả Nguyễn Văn Dương, Bùi Mạnh Cường và cộng sự [4] kết hợp giữa thực nghiệm với mô phỏng quá trình VSR trên phần mềm ANSYS cho mẫu thép hàn CT3. Kết quả của mô phỏng và thực nghiệm đều cho thấy tần số lực cưỡng bức trong vùng cộng hưởng cho hiệu quả giảm USD tốt hơn so với các tần số ở vùng khác, đặc biệt là việc khử USD trên bề mặt của mẫu.

Năm 2018, nhóm tác giả Li, Fang [62] nghiên cứu sự thay đổi tần số tự nhiên trước và sau khi VSR của mẫu thép hàn hình chữ nhật có vật liệu DH36. Các tác giả đã tiến hành rung mẫu tại tần số cộng hưởng (70Hz) trong vòng 20 phút, biên độ rung động gồm hai mức công suất của thiết bị rung là 1kW và 2kW. USD được đo trước và sau VSR bằng phương pháp khoan lỗ. Kết quả của nghiên cứu cho thấy tần số riêng sau khi VSR được giảm đi. Tuy nhiên, USD giảm theo các phương là không đồng nhất. Nhưng việc giảm đáng kể tần số dao động riêng là dấu hiệu cho thấy sự giảm USD theo cả hai phương, đồng thời các tác giả cũng đề xuất nên nghiên cứu đầy đủ hơn nữa về mối quan hệ giữa sự thay

đổi tần số dao động riêng của mẫu với mức giảm USD để có cơ sở làm tiêu chí đánh giá hiệu quả của quá trình VSR.

Năm 2020, Zhang và cộng sự [58] nghiên cứu VSR bằng siêu âm (UVSR- Ultrasonic vibratory stress relief) cho mẫu dạng tấm. Kết quả thí nghiệm chỉ ra rằng tỷ lệ giảm USD đạt tới 53% và hiệu quả giảm USD chỉ đạt được khi ứng suất tải phải vượt qua giới hạn đàn hồi vật liệu, đồng thời nghiên cứu cũng chỉ ra USD giảm theo một phương tỷ lệ thuận với biên độ tải đưa vào theo phương đó.

Năm 2021, Song và cộng sự [33] đã kết hợp phương pháp giảm USD bằng nhiệt và bằng rung động (TVSR-Thermal vibration stress relief) để nghiên cứu về sự phát triển và qui luật phân bố USD, các đặc trưng bền, độ cứng, chuyển biến pha và cấu trúc của kim loại trong quá trình TVSR. Kết quả thí nghiệm chỉ ra rằng tỷ lệ giảm USD theo chu vi và theo phương hướng tâm có thể đạt được tương ứng là 44,43% và 45,14% sau TVSR. Sự giảm ứng suất dư sau TVSR được cho là do sự chuyển biến linh hoạt của các sai lệch và các pha trong vật liệu.

Năm 2021, Huang và cộng sự [27] đã kết hợp giữa rung động và từ tính (Magnetic - vibration treatment) để giảm USD. Bằng kết quả thí nghiệm, tác giả tiến hành so sánh ảnh hưởng độc lập từng phương pháp sau đó so sánh với kết quả kết hợp từ đó cho thấy cả 3 phương pháp đều làm giảm USD. Trong đó phương pháp kết hợp cho kết quả tốt nhất, và ảnh hưởng của phương pháp kết hợp là lớn hơn tổng ảnh hưởng của từng phương pháp đơn lẻ. Cả ba phương pháp đều làm giảm USD bằng cách cung cấp năng lượng để tăng chuyển động của các khối lệch trong vật liệu và gây ra hiện tượng trượt lệch. So với hai phương pháp còn lại, xử lý bằng rung động kết hợp từ tính thúc đẩy sự biến đổi các miền từ thành các miền phân lớp đồng đều và chuyển động lệch vị trí kích

thích ở nhiều vùng hơn để giảm USD. Cả 3 phương pháp đều không gây ảnh hưởng đáng kể tới kích thước và cấu trúc của các hạt tinh thể.

1.4.2. Nghiên cứu về ảnh hưởng của rung khử ứng suất dư tới các đặc trưng mỏi của kết cấu.

Phương pháp rung động có khả năng làm giảm USD cho chi tiết. Tuy nhiên, rung động với biên độ lớn cũng có thể làm giảm các đặc trưng bền mỏi của chi tiết, kết cấu. Trên thế giới và trong nước cũng đã có một số nhà khoa học quan tâm đến vấn đề này, một số nghiên cứu tiêu biểu có thể kể đến như:

Năm 1991, Fang và cộng sự [23] dùng thực nghiệm để nghiên cứu ảnh hưởng của VSR tới tuổi thọ của mẫu hàn. Tác giả đã chuẩn bị hai nhóm mẫu thép hàn, được dán nhãn nhóm A và B. Các mẫu thuộc nhóm A được VSR, còn các mẫu thuộc nhóm B không xử lý khử USD. Các thử nghiệm mỏi uốn phẳng được thực hiện trên cả hai nhóm cho thấy tuổi thọ mỏi của nhóm A cao hơn 25% so với nhóm B.

Năm 2001, Webster [25] và Lu [70] đã phân tích và so sánh các cơ chế của VSR và khử USD bằng nhiệt. Họ coi cả hai phương pháp đều giống nhau về bản chất để giảm USD vĩ mô vì cả hai đều giải phóng USD vĩ mô thông qua biến dạng. Tuy nhiên, do các quá trình biến dạng dẻo không giống nhau nên các tác giả kết luận rằng VSR có thể được sử dụng trong nhiều trường hợp và tốt hơn khử USD bằng nhiệt về độ ổn định kích thước và độ bền mỏi.

Cũng trong năm 2001, nhóm tác giả Munsif, Waddell và Walker [63] đã tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của các phương pháp khử USD tới tuổi thọ mỏi của mối hàn và sự thay đổi USD trong phương pháp rung khử. Tác giả dùng mẫu thép hàn có kích thước 290×76,2×6,35 cm, vật liệu là thép BS970 080A15 chứa 0,18% các bon, mẫu được tạo một đường hàn ngang cách mặt đầu là 40 mm bằng công nghệ hàn MIG, đường hàn này nằm tại vị trí có biến

dạng lớn nhất khi kẹp mẫu lên bàn rung kiểu công xôn. Tác giả sử dụng 42 mẫu để nghiên cứu tuổi thọ mỏi theo ba phương án đó là: không khử USD, khử USD bằng nhiệt và VSR. Mẫu hàn được khử USD ở nhiệt độ 915°C trong thời gian 70 phút, các mẫu VSR với thời gian rung là 5 giây, tần số rung là 25 Hz với biên độ 370 MPa. USD được đo bằng phương pháp nhiễu xạ tia X. Tất cả các mẫu đều được kiểm tra về tuổi thọ mỏi. Từ đó, tác giả đi đến kết luận so với các mẫu không được khử USD, tuổi thọ của các mẫu được khử USD bằng phương pháp nhiệt giảm 43%, trong khi các mẫu được khử USD bằng phương pháp rung động có tuổi thọ tăng lên 17%. Tuổi thọ của các mẫu trong phương pháp nhiệt giảm bởi vì với nhiệt độ ủ khử làm đặc tính cơ học của vật liệu giảm.

Năm 2011, Djuric cùng cộng sự [17] dùng thực nghiệm để nghiên cứu ảnh hưởng của rung động tới USD và phá hủy mỏi của mẫu thép hàn chữ thập. Mẫu được làm bằng thép cường độ cao ARMOX 500T dày 7 mm, sử dụng theo công nghệ hàn GMAW. Mẫu được VSR trong vòng 20 phút. Nghiên cứu tiến hành đo USD bằng phương pháp nhiễu xạ tia X, biến dạng trước và sau VSR được xác định bằng công nghệ quét 3D. Qua nghiên cứu tác giả đã kết luận: không có biến dạng đáng kể nào sau khi VSR, có sự thay đổi lớn về USD vĩ mô ở bề mặt của mẫu thử gần với mối hàn, nhưng không chắc chắn về xu hướng. Các tác giả cũng khẳng định VSR làm gia tăng nguy cơ phá hủy do mỏi và chỉ ra các hạn chế của nghiên cứu là chưa có các phép đo thể hiện giá trị cụ thể của USD và tuổi thọ mỏi của mẫu.

Năm 2013, Wang và cộng sự [72] sử dụng phương pháp số để nghiên cứu những ảnh hưởng của rung động đến USD và tuổi thọ mỏi của kết cấu. Đối tượng khảo sát là mối hàn giáp mối, vật liệu là thép Q235, chia lưới bằng các phần tử khối 6 mặt 8 nút. Trong nghiên cứu này, USD của mẫu được mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn nhiệt đàn dẻo và quá trình giảm

USD tại mỗi hàn được phân tích. Tuổi thọ mỗi của tấm hàn khi chịu tải theo chu kỳ cũng được dự báo bằng số dựa trên USD hàn và USD còn lại sau rung khử. Kết quả tính toán số được so sánh với tính toán theo tiêu chuẩn GB 50017-2003 về thiết kế kết cấu thép hiện tại của Trung Quốc. Kết quả nghiên cứu cho thấy, tuổi thọ mỗi được tính toán dựa trên các công thức của tiêu chuẩn thiết kế thép thấp hơn nhiều so với phương pháp số. Tuy nhiên, nếu xét về phương diện dự báo tuổi thọ mỗi của các kết cấu hàn trước và sau khử USD, thì phương pháp tính toán số là phương pháp khả thi.

Năm 2016, Song và cộng sự [41] đã sử dụng thực nghiệm VSR để nghiên cứu khả năng cải thiện tuổi thọ mỗi của hợp kim nhôm 7075-T651. Các tác giả đã tiến hành thí nghiệm trên 3 nhóm mẫu gồm nhóm A không xử lý USD, nhóm B xử lý bằng rung động với lực là 50 N, tần số 435 Hz và thời gian xử lý là 10 phút, nhóm C xử lý rung động với lực là 150 N, tần số 435 Hz và thời gian xử lý là 10 phút. Các thông số cần đặt ban đầu của quá trình thí nghiệm như tần số cộng hưởng, phân bố ứng suất khi mẫu chịu tải được xác định nhờ mô phỏng. USD được đo bằng nhiễu xạ tia X. Các nhóm mẫu đều được tiến hành thí nghiệm mỗi dưới tác dụng của tải trọng dạng kéo nén để xây dựng các đường cong mỗi. Từ kết quả nghiên cứu thực nghiệm chỉ ra rằng quá trình rung có hiệu quả trong việc giảm và cân bằng các USD, và có thể cải thiện tuổi thọ mỗi của hợp kim nhôm 7075-T651 khi ứng suất động không vượt quá 8% giới hạn chảy.

Năm 2017, Gao và cộng sự [31] sử dụng thực nghiệm để xây dựng đường cong mỗi cho vật liệu Ti-6Al-4V và đánh giá ảnh hưởng của rung khử USD tới tuổi thọ mỗi của kết cấu. Nghiên cứu sử dụng 240 mẫu được chia thành 6 nhóm, các nhóm bao gồm: nhóm A không xử lý USD; nhóm từ B đến E xử lý bằng VSR với các biên độ tăng dần, thời gian rung là 10 phút tại tần số cộng hưởng; nhóm F xử lý USD bằng ủ khử. Các tần số dao động riêng và

phân bố ứng suất được xác định nhờ mô phỏng. USD được đo bằng phương pháp khoan lỗ để đánh giá hiệu quả giảm USD. Thí nghiệm mỏi được tiến hành với dạng tải kéo nén. Kết quả cho thấy khử USD bằng rung động và ủ khử có ảnh hưởng tiêu cực đến tuổi thọ mỏi của Ti-6Al-4V. Tuổi thọ mỏi giảm khi tăng biên độ rung khử. Đường cong mỏi của xử lý ủ khử thường thấp hơn so với các đường cong mỏi với chế độ rung khử có biên độ khác nhau. Mặc dù hiệu quả giảm USD của phương pháp rung khử tốt hơn nhưng nếu rung khử với biên độ cao có thể làm giảm tuổi thọ mỏi Ti-6Al-4V do quá trình rung khử có thể tạo ra các khuyết tật. Rung khử với biên độ thấp có thể làm giảm USD một cách hiệu quả với tuổi thọ mỏi giảm đi rất ít.

Năm 2018, Gao và cộng sự [32] nghiên cứu ảnh hưởng của VSR tới ứng xử mỏi của mẫu làm bằng hợp kim nhôm 7075-T651. Ứng suất động sinh ra trong quá trình dao động được đo, USD trước và sau khi rung khử được so sánh để đánh giá khả năng giảm USD. Thí nghiệm mỏi được tiến hành trên các nhóm mẫu được rung khử với các biên độ rung khác nhau. Kết quả thí nghiệm thể hiện rằng khi biên độ rung khử còn nhỏ (thấp hơn 0,01mm), thì tuổi thọ mỏi hầu như không bị ảnh hưởng bởi VSR. Tuổi thọ mỏi tăng lên cùng với sự tăng của biên độ VSR khi biên độ thay đổi từ 0,01mm đến 0,04mm. Giới hạn mỏi tăng lên tới 11,11% khi biên độ rung khử là 0,04mm. Tuổi thọ mỏi giảm dần theo sự tăng của biên độ VSR khi biên độ rung thay đổi từ 0,05 mm tới 0,1 mm. VSR với biên độ 0,1 mm tuổi thọ mỏi giảm tới 11%. Các tác giả kết luận rằng biên độ VSR thấp có khả năng cải thiện được tuổi thọ mỏi, còn với biên độ VSR cao thì làm giảm tuổi thọ mỏi của mẫu hợp kim nhôm 7075-T651.

Năm 2020, Ilman và cộng sự [48] dùng dao động trong quá trình hàn để hàn các tấm hợp kim nhôm 5083-H116 ở các tần số khác nhau 100, 300 và 500 Hz nhằm tăng cường độ bền và chống lại sự phát triển vết nứt do mỏi cho

các mối hàn. Cấu trúc tế vi được quan sát, độ cứng và độ bền kéo được kiểm tra, USD được đo và thí nghiệm về sự phát triển vết nứt mỗi được tiến hành. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, rung trong quá trình hàn làm tăng giới hạn bền mỏi của mối hàn, độ tăng lớn nhất đạt được tại tần số rung là 300 Hz là 51,3%. Các cấu trúc hạt mịn kết hợp với USD nén sinh ra do quá trình dao động có thể hạn chế sự phát triển của vết nứt mỏi trong mối hàn.

1.4.3. Một số vấn đề rút ra từ tình hình nghiên cứu công nghệ rung khử ứng suất dư.

Trên cơ sở tổng hợp, phân tích, đánh giá tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước về VSR có thể chỉ ra những vấn đề còn tồn tại mà luận án cần quan tâm giải quyết như sau:

1. Đã có nhiều nghiên cứu khẳng định khả năng giảm USD bằng rung động. Các phương pháp được sử dụng bao gồm cả phương pháp mô phỏng và phương pháp thực nghiệm. Một số nghiên cứu dùng mô phỏng VSR để khảo sát ảnh hưởng của các tham số rung khử (biên độ rung, tần số rung và thời gian rung) tới khả năng giảm USD. Tuy nhiên còn có hạn chế về việc khảo sát thời gian rung còn ít và hình thức gia tải chưa sát với VSR trong thực tế, vì vậy cần xây dựng một mô hình tính toán, mô phỏng sát thực hơn.

2. Hầu hết các nghiên cứu tập trung làm rõ ảnh hưởng của biên độ rung khử tới khả năng giảm USD, kết quả của các nghiên cứu này đều khẳng định biên độ rung khử phải tạo ứng suất vượt qua giới hạn chảy của vật liệu thì quá trình rung khử mới có hiệu quả giảm USD. Tuy nhiên, qui luật về mối quan hệ giữa lượng USD được giảm với biên độ gia tốc rung chưa được làm rõ và thống nhất, nhiều nghiên cứu cho rằng mối quan hệ đó là tuyến tính... Các vấn đề này cần phải tiếp tục nghiên cứu làm rõ.

3. Nghiên cứu ảnh hưởng của VSR tới các đặc trưng môi của kết cấu còn khá khiêm tốn. Hầu hết công bố đều sử dụng kết quả thí nghiệm, một số tác giả sử dụng công thức Basquin để tính tuổi thọ môi của chi tiết sau rung khử nhưng không kể đến ảnh hưởng của tải chu kỳ do rung. Việc tính giới hạn môi còn chưa được quan tâm, chưa xây dựng được phương pháp tính giới hạn môi bằng lý thuyết để định hướng.

4. Hầu hết các công trình nghiên cứu đều chỉ tập trung vào nghiên cứu khả năng giảm USD của phương pháp rung khử hoặc ảnh hưởng của các tham số rung khử tới các đặc trưng môi của chi tiết, mà chưa có công trình nào nghiên cứu liên mạch hai vấn đề này. Các công bố về ảnh hưởng của các tham số rung khử tới các đặc trưng bền môi của chi tiết còn rời rạc, chưa thống nhất, đặc biệt chưa có công bố nào nghiên cứu ảnh hưởng đồng thời của các tham số rung khử (biên độ rung, thời gian rung, tần số rung) tới khả năng giảm USD và khả năng cải thiện các đặc trưng bền môi của chi tiết, kết cấu.

1.5. Định hướng nghiên cứu và các nhiệm vụ của luận án.

Như đã trình bày ở phần trên, hiệu quả giảm USD của công nghệ rung khử là rõ ràng. Tuy nhiên, mối quan hệ giữa các tham số liên quan đến quá trình rung khử và sự thay đổi của USD, cũng như ảnh hưởng của quá trình rung khử tới các đặc trưng môi của chi tiết còn chưa được làm rõ và ít được quan tâm nghiên cứu. Cùng với nhu cầu sử dụng công nghệ này ngày một tăng cao, việc đánh giá toàn diện về các ảnh hưởng của công nghệ VSR tới các đặc trưng cơ học của chi tiết là cần thiết. Vì vậy, ảnh hưởng của tham số công nghệ VSR tới các đặc trưng môi của chi tiết cần tiếp tục được nghiên cứu làm rõ. VSR chính là quá trình cho chi tiết chịu tải chu kỳ. Do vậy, việc xây dựng phương trình mô tả chuyển động của chi tiết có USD, và việc xây dựng biểu thức thể hiện mối quan hệ về các đặc trưng môi của chi tiết trước và sau khi VSR là những việc quan trọng và cần thiết trong việc tìm kiếm một

phương pháp hiệu quả để giải bài toán VSR cho chi tiết.

Vì vậy, các nhiệm vụ được đặt ra trong luận án này là:

1. Xây dựng phương trình chuyển động tổng quát của chi tiết để mô tả quá trình rung khử USD. Xây dựng chương trình để mô phỏng quá trình VSR của chi tiết với mô hình mô phỏng sát với quá trình VSR cho mẫu thực.

2. Xây dựng các hệ thức thể hiện mối quan hệ về các đặc trưng mỏi của chi tiết trước và sau khi được xử lý bằng phương pháp rung động. Trong các hệ thức đó có xét tới sự ảnh hưởng của tải chu kỳ do rung khử.

3. Khảo sát ảnh hưởng của các bộ tham số trong các chế độ VSR đến khả năng giảm USD và mức thay đổi các đặc trưng bền mỏi của chi tiết, các chế độ rung khử được lựa chọn khảo sát nhằm mục đích làm rõ xu hướng ảnh hưởng của các tham số đến hiệu quả rung khử.

4. Nghiên cứu thực nghiệm kiểm chứng độ tin cậy của các kết quả tính toán, mô phỏng và đề xuất một số chế độ VSR hợp lý.

Kết luận chương 1

Chương 1 đã trình bày một số nét cơ bản nhất về những vấn đề liên quan đến USD như các phương pháp xác định, các phương pháp khử USD... Trong đó, phương pháp VSR được đề cập một cách chi tiết. Đặc biệt, qua sự phân tích đánh giá các công trình nghiên cứu ở trong nước và trên thế giới về ảnh hưởng của rung khử tới khả năng giảm USD và cải thiện các đặc trưng bền mỏi của chi tiết, luận án đã xác định được những vấn đề cần tập trung nghiên cứu, làm rõ thêm.

Chương 2

CƠ SỞ LÝ THUYẾT RUNG KHỬ ỨNG SUẤT DƯ VÀ XÁC ĐỊNH ĐẶC TRƯNG BỀN MỎI CỦA CHI TIẾT CÓ ỨNG SUẤT DƯ

Giảm USD bằng rung động cho hiệu quả vượt trội so với các phương pháp truyền thống và ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong chế tạo sản xuất, đặc biệt là chế tạo các chi tiết đòi hỏi độ chính xác và độ tin cậy cao. Việc VSR với chế độ rung hợp lý có thể làm giảm USD kéo có hại và phân bố lại ứng suất theo hướng đồng đều hơn. Giảm USD và phân bố ứng suất là lý do chính làm cho chi tiết, kết cấu ổn định về hình dáng và kích thước hơn trong nguyên công chế tạo tiếp theo. Tuy nhiên, khi VSR, chi tiết, kết cấu cũng chịu tải thay đổi có chu kỳ với biên độ lớn, loại tải này cũng gây tổn thất về mỏi cho chi tiết, kết cấu. Như vậy, trong quá trình VSR, chi tiết, kết cấu sẽ chịu hai yếu tố bất lợi là: USD có hại cần được giảm, và tải chu kỳ biên độ lớn do VSR. Tải chu kỳ làm giảm USD nhưng lại làm tổn thất mỏi của chi tiết, kết cấu. Do vậy cần phải nghiên cứu để làm rõ mối quan hệ giữa biên độ tải rung khử và lượng USD được giảm, cũng như ảnh hưởng của cả hai yếu tố này tới các đặc trưng mỏi của chi tiết, kết cấu được rung khử.

Để có cơ sở lý thuyết phục vụ việc nghiên cứu ảnh hưởng của VSR đến các đặc trưng mỏi của chi tiết, chương này sẽ đề cập đến các nội dung sau:

- Mô tả quá trình truyền nhiệt và sự hình thành USD do gia nhiệt cục bộ.
- Thiết lập hệ phương trình chuyển động của chi tiết có USD chịu dao động cưỡng bức.
- Đề xuất thuật toán để xác định bằng số giới hạn bền mỏi và tuổi thọ mỏi của chi tiết trước và sau khi VSR. Qua đó có thể đánh giá được hiệu quả của phương pháp trong việc cải thiện các đặc trưng bền mỏi của chi tiết.

2.1. Cơ sở quá trình hình thành ứng suất dư và rung khử ứng suất dư.

Ta biết rằng USD được hình thành trong chi tiết và kết cấu có liên quan đến hầu hết các nguyên công, từ tạo phôi đến gia công tinh. Ở đây, luận án tập trung vào nghiên cứu ảnh hưởng của công nghệ VSR đến khả năng giảm USD của kết cấu, đặc biệt là các kết cấu hàn, đúc. Theo đó, việc hình thành USD liên quan đến quá trình hàn sẽ được quan tâm.

2.1.1. Mô hình truyền nhiệt.

Hình 2. 1 biểu diễn mô hình quá trình truyền nhiệt do gia nhiệt cục bộ. Trong đó $Oxyz$ là hệ trục tọa độ cố định, $O'\varphi\nu\xi$ là hệ trục tọa độ di động gắn với nguồn nhiệt và các mô tả toán học có liên quan đối với chi tiết chịu nhiệt.

Để phù hợp với phương pháp gia nhiệt tạo ứng suất dư trên mẫu trong mô phỏng và thí nghiệm, giả thiết dòng nhiệt phân bố theo qui luật Gauss [24] trong mặt phẳng Oxy và di chuyển theo trục z . Với các ký hiệu được định nghĩa như trên thì biểu thức của lượng nhiệt trong hệ tọa độ $O'\varphi\nu\xi$ có dạng:

$$Q(x, \xi) = \frac{3W}{\pi r^2} e^{\frac{-x^2}{r^2}} e^{\frac{-3\xi^2}{r^2}} \quad (2.1)$$

trong đó W là mức năng lượng đầu vào (W); r là bán kính đặc trưng của phân bố dòng nhiệt (m) cũng là khoảng cách từ điểm bất kỳ trên mặt $O'\varphi\nu\xi$ tới O' .

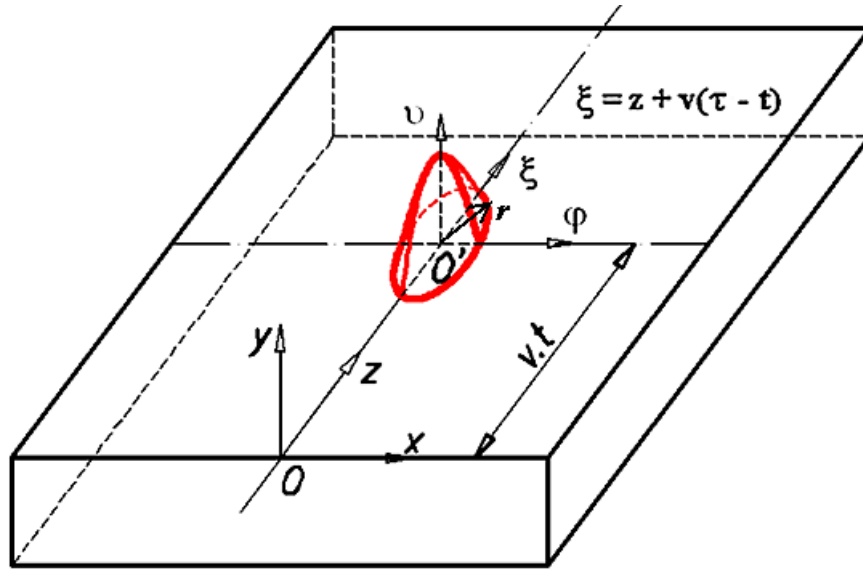
Trong hệ tọa độ $Oxyz$ biểu thức của lượng nhiệt có dạng:

$$Q(x, \xi) = \frac{3W}{\pi r^2} e^{\frac{-x^2}{r^2}} e^{\frac{-3[z+v(\tau-t)]^2}{r^2}} \quad (2.2)$$

trong đó:

τ là độ trễ (s);

v là vận tốc di chuyển của nguồn nhiệt (m/s).



Hình 2. 1: Mô tả nguồn nhiệt di động.

Phương trình biểu diễn quá trình truyền nhiệt ba chiều với sự tham gia của nguồn nhiệt được Fourier thành lập như sau [40]:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \{L\}^T \{q^h\} + Q \quad (2.3)$$

trong đó ρ - khối lượng riêng của vật liệu (kg/m^3); c - nhiệt dung riêng của vật liệu ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$); t - thời gian (s); $T = T(x, y, z, t)$ là hàm nhiệt độ ($^\circ\text{C}$); $\{L\}$ là véc tơ gradient; $\{q^h\}$ là véc tơ dòng nhiệt; Q là lượng nhiệt sinh ra trong một đơn vị thể tích.

Theo [40], quan hệ giữa véc tơ dòng nhiệt và gradient nhiệt độ được cho bởi:

$$\{q^h\} = -[K^{tr}] \cdot \{L\} \cdot T \quad (2.4)$$

trong đó $[K^{tr}]$ là ma trận đường chéo có dạng:

$$[K^{tr}] = \begin{bmatrix} K_x^{tr} & 0 & 0 \\ 0 & K_y^{tr} & 0 \\ 0 & 0 & K_z^{tr} \end{bmatrix}$$

với K_x^{tr} , K_y^{tr} , K_z^{tr} lần lượt là hệ số dẫn nhiệt theo các phương x , y và z .

Kết hợp các phương trình (2.3) và (2.4) ta đi đến phương trình:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + \{L\}^T [K^r] \{L\} \cdot T = Q \quad (2.5)$$

Bài toán truyền nhiệt liên quan đến 3 dạng điều kiện biên như sau [40]:

a) Biết trước nhiệt độ trên diện tích S_1 của bề mặt:

$$T = \bar{T} \quad (2.6)$$

b) Biết trước dòng nhiệt truyền qua bề mặt khảo sát S_2 (dẫn nhiệt):

$$\bar{q} = -\{q^h\}^T \{\eta\} \quad (2.7)$$

Khi kết hợp với (2.4), điều kiện biên này có dạng:

$$\{\eta\}^T [K^r] \{L\} \cdot T = \bar{q} \quad (2.8)$$

với $\{\eta\}$ là véc tơ pháp tuyến đơn vị của bề mặt S_2 và $\bar{q}$ là dòng nhiệt qua bề mặt.

c) Biết trước lượng nhiệt đối lưu và bức xạ qua bề mặt S_3 nào đấy:

$$\{q^h\}^T \{\eta\} = h_f (T - T_B) \quad (2.9)$$

với h_f là hệ số đối lưu nhiệt; T_B là nhiệt độ môi trường; T là nhiệt độ trên bề mặt của mô hình.

Với (2.4), điều kiện (2.9) trở thành:

$$\{\eta\}^T [K^r] \{L\} \cdot T = h_f (T_B - T) \quad (2.10)$$

Nhân hai vế của (2.5) với gia số nhiệt độ δT , tích phân theo thể tích phần tử V_e và kết hợp với các phương trình (2.8), (2.10) ta được:

$$\int_{V_e} \left(\rho c \delta T \frac{\partial T}{\partial t} + \{L\}^T \delta T [K^r] \{L\} T \right) dV_e = \int_{V_e} \delta T \bar{q} dS_2 + \int_{S_3} \delta T h_f (T_B - T) dS_3 + \int_{V_e} \delta T Q dV_e \quad (1.11)$$

Theo lý thuyết phần tử hữu hạn [53], nhiệt độ T của phần tử được xác định thông qua nhiệt độ của các nút theo công thức:

$$T = [N]^T \{T_e\} \quad (2.12)$$

với $[N] = [N(x, y, z)]$ là ma trận hàm dạng về nhiệt độ của phần tử, còn $\{T_e\} = \{T_e(t)\}$ là véc tơ nhiệt độ nút của phần tử. Suy ra:

$$\dot{T} = \frac{dT}{dt} = [N]^T \{\dot{T}_e\}; \quad \delta T = [N]^T \{\delta T_e\} \quad (2.13)$$

Nhân hai vế của (2.12) với $\{L\}$ dẫn đến:

$$\{L\}T = [A]\{T_e\} \quad (2.14)$$

trong đó:

$$[A] = \{L\}[N]^T$$

Thay (2.13), (2.14) vào (2.11) và lưu ý rằng $\{\delta T_e\}^T$ không phụ thuộc vào thể tích ta được:

$$\begin{aligned} \{\delta T_e\}^T & \left(\int_{V_e} \rho c [N][N]^T \{\dot{T}_e\} dV_e + \int_{V_e} [A]^T [K^{tr}] [A] \{T_e\} dV_e \right) = \{\delta T_e\}^T \left(\int_{S_2} [N] \bar{q} dS_2 + \right. \\ & \left. + \int_{V_e} [N] Q dV_e + \int_{S_3} [N] h_f (T_B - [N]^T \{T_e\}) dS_3 \right) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Do các thành phần của $\{\delta T_e\}^T$ là độc lập nên từ (2.15) ta suy ra:

$$\begin{aligned} \rho \int_{V_e} c [N][N]^T dV_e \{\dot{T}_e\} + \int_{V_e} [A]^T [K^{tr}] [A] dV_e \{T_e\} &= \int_{S_2} [N] \bar{q} dS_2 + \int_{V_e} Q [N] dV_e + \\ &+ \int_{S_3} T_B [N] h_f dS_3 - \int_{S_3} h_f [N][N]^T \{T_e\} dS_3 \end{aligned} \quad (2.16)$$

Phương trình (2.16) có thể được viết dưới dạng ma trận:

$$[C_e^t] \{\dot{T}_e\} + ([K_e^{tb}] + [K_e^{tc}]) \{T_e\} = \{Q_e^f\} + \{Q_e^c\} + \{Q_e^g\} \quad (2.17)$$

trong đó:

$$[C_e^t] = \rho \int_{V_e} c [N][N]^T dV_e \text{ - ma trận nhiệt dung riêng phần tử;}$$

$$[K_e^{tb}] = \int_{V_e} [A]^T [K^{tr}] [A] dV_e \text{ - ma trận hệ số dẫn nhiệt phần tử;}$$

$$[K_e^{tC}] = \int_{S_3} h_f [N][N]^T dS_3 - \text{ma trận hệ số truyền nhiệt đối lưu qua bề mặt}$$

của phần tử;

$$\{Q_e^f\} = \int_{S_2} [N] \bar{q} dS_2 - \text{véc tơ lưu lượng nhiệt của phần tử};$$

$$\{Q_e^c\} = \int_{S_3} T_B [N] h_f dS_3 - \text{véc tơ dòng nhiệt đối lưu qua bề mặt phần tử};$$

$$\{Q_e^g\} = \int_{V_e} Q [N] dV_e - \text{véc tơ tải trọng nhiệt của phần tử}.$$

Phương trình (2.17) biểu diễn quá trình truyền nhiệt của phần tử. Nó cho phép xác định trường nhiệt độ của vật thể trong cả hai quá trình gia nhiệt và làm nguội. Dữ liệu về trường nhiệt độ (nhiệt độ tại các nút phần tử theo thời gian) của vật thể sẽ được sử dụng để tính USD do quá trình gia nhiệt.

2.1.2. Sự hình thành ứng suất do quá trình gia nhiệt.

Công nội lực sinh ra trên phần tử do quá trình gia nhiệt được xác định theo công thức [54]:

$$\delta U = \int_{V_e} \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dV_e \quad (2.18)$$

trong đó $\{\varepsilon\}$ là véc tơ biến dạng; $\{\sigma\}$ là véc tơ ứng suất; V_e là thể tích của phần tử khảo sát.

Quan hệ ứng suất - biến dạng theo định luật Hook trong trường hợp gia nhiệt có thể được biểu diễn ở dạng ma trận như sau:

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon^{el}\} \text{ hay } \{\sigma\} = [D] (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{th}\}) \quad (2.19)$$

trong đó $[D]$ là ma trận đàn hồi thể hiện mối quan hệ, $\{\varepsilon^{el}\}$ là véc tơ biến dạng đàn hồi và $\{\varepsilon^{th}\}$ là véc tơ biến dạng nhiệt. Do nhiệt độ của kết cấu thay đổi (theo cả thời gian và không gian) nên biến dạng nhiệt của phần tử được tính theo công thức:

$$\{\varepsilon^{th}\} = \int_{T_B}^T \alpha(T).TdT \quad (2.20)$$

trong đó T_B là nhiệt độ môi trường; T là nhiệt độ tức thời tại thời điểm đang xét; $\alpha(T)$ là hệ số dẫn nở nhiệt.

Thay (2.19) vào (2.18) ta được:

$$\delta U = \int_{V_e} \left(\{\delta\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} - \{\delta\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon^{th}\} \right) dV_e \quad (2.21)$$

Gọi $[B]$ là ma trận mô tả quan hệ giữa biến dạng và chuyển vị phần tử (ma trận chứa các đạo hàm của hàm dáng), $\{q\}$ là véc tơ chuyển vị nút phần tử, ta có:

$$\{\varepsilon\} = [B] \{q\} \quad (2.22)$$

Thay (2.22) vào (2.21) và thiết lập điều kiện cân bằng của phần tử đang xét, ta thu được phương trình:

$$\delta U = \{\delta q\}^T \int_{V_e} [B]^T [D] [B] \{q\} dV_e - \{\delta q\}^T \int_{V_e} [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV_e = 0 \quad (2.23)$$

Do các thành phần của véc tơ gia số chuyển vị $\{\delta q\}^T$ là độc lập nên để (2.23) thỏa mãn ta phải có:

$$\int_{V_e} [B]^T [D] [B] \{q\} dV_e - \int_{V_e} [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV_e = 0 \quad (2.24)$$

hay:

$$[K_e] \{q\} = \{F^{th}\} \quad (2.25)$$

trong đó $[K_e] = \int_{V_e} [B]^T [D] [B] dV_e$ là ma trận độ cứng của phần tử, còn

$\{F^{th}\} = \int_{V_e} [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV_e$ là véc tơ tải trọng nhiệt của phần tử.

Hệ hai phương trình (2.17) và (2.25) có thể được viết dưới dạng ma trận như sau [73]:

$$\begin{bmatrix} [O] & [O] \\ [O] & [C'] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{q}\} \\ \{\dot{T}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [O] \\ [O] & [K'] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q\} \\ \{T\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} \quad (2.26)$$

trong đó:

$[K] = \sum_e [K_e]$ - ma trận độ cứng cơ học của chi tiết;

$[K'] = \sum_e ([K_e^{tb}] + [K_e^{tC}])$ - ma trận độ cứng nhiệt của chi tiết;

$[O]$ - ma trận không (tất cả các phần tử đều là số 0);

$[C'] = \sum_e [C_e^t]$ - ma trận cản nhiệt của chi tiết;

$\{F\} = \sum_e \{F_e^{th}\}$ - véc tơ tải trọng do nhiệt của chi tiết;

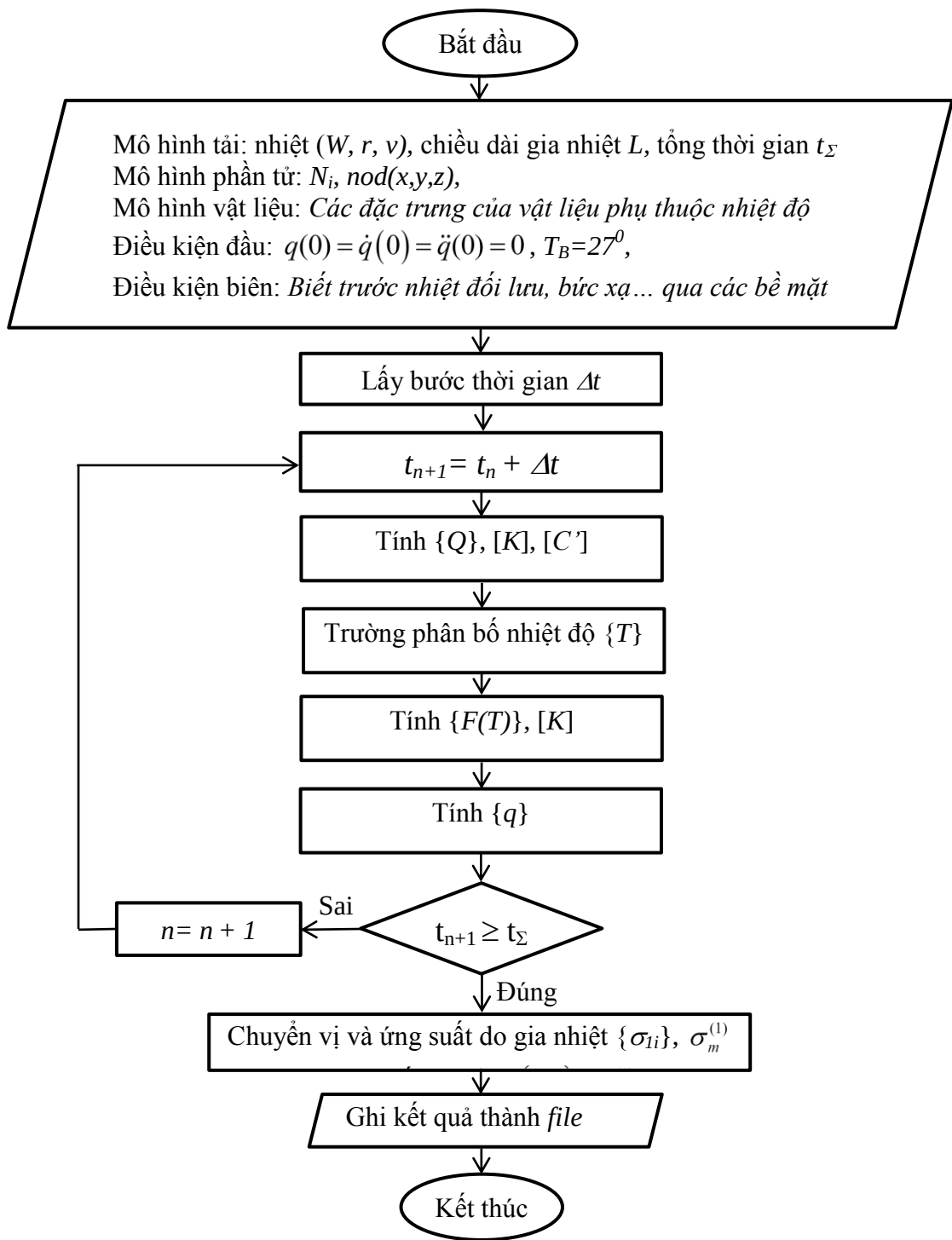
$\{Q\} = \sum_e (\{Q_e^f\} + \{Q_e^c\} + \{Q_e^g\})$ - véc tơ tải nhiệt chi tiết.

Phương trình (2.26) là cơ sở để xác định trường USD của chi tiết do quá trình gia nhiệt. Nó mô tả đồng thời hai quá trình, gồm quá trình truyền nhiệt và quá trình tạo USD do nhiệt. Việc xác định USD do quá trình gia nhiệt nhằm cung cấp trường ứng suất đầu vào cho bài toán VSR.

Tóm tắt thuật toán gồm các bước chính sau:

1. Thiết lập bước thời gian tính Δt
2. Tính các ma trận $[K]$, $[K']$, $\{Q\}$ và $[C']$
3. Tính trường phân bố nhiệt độ $\{T\}$ theo (2.26)
4. Tính ε^{th} từ đó tính $\{F\}$
5. Tính $\{q\}$ theo (2.26) từ đó tính được biến dạng theo (2.22) và tính được ứng suất sau quá trình nhiệt theo (2.19).

Sơ đồ khối của thuật toán trên được thể hiện như trên *Hình 2. 2*



Hình 2. 2: Sơ đồ thuật toán bài toán Nhiệt- Cơ

2.1.3. Xây dựng phương trình chuyển động của chi tiết khi rung khử ứng suất dư.

Việc xây dựng phương trình chuyển động của chi tiết trong quá trình VSR được thực hiện với một số giả thiết sau:

- 1) Vật liệu làm chi tiết có tính liên tục, đồng chất và đẳng hướng;
- 2) Coi biến dạng của chi tiết là nhỏ và xem thể tích của chi tiết không thay đổi khi bị biến dạng;
- 3) Nội lực được xem là lực có thể trên các chuyển vị bổ sung;
- 4) Coi quá trình biến dạng của vật liệu chi tiết là quá trình đàn dẻo tuân theo tiêu chuẩn chảy dẻo Von Mises với quy luật tái bền động học theo hai đường thẳng.

Từ giả thiết thứ 4, hàm chảy dẻo f và hàm thế năng dẻo g trùng nhau ($f \equiv g$). Khi đó, các phương trình chảy dẻo được viết theo hệ quả của định đề Drucker về tính pháp tuyến (vector gia số biến dạng dẻo $d\{\varepsilon\}_p$ tại điểm trong vuông góc với mặt chảy (mặt đặt tải) $f = F(\{\sigma\}, \{\alpha\}, \kappa)$) và có dạng sau [2, 7, 54]:

$$d\{\varepsilon\}_p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \{\sigma\}} = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \{\sigma\}} \quad (2.27)$$

ở đây $\lambda > 0$ là một hệ số bất định, thay đổi trong suốt lịch sử quá trình biến dạng dẻo.

Ngoài ra, quan hệ giữa gia số của các thành phần ứng suất và biến dạng có thể được viết dưới dạng sau:

$$d\{\sigma\} = [D]_{ep}^* d\{\varepsilon\} \quad (2.28)$$

trong đó $[D]_{ep}^*$ là ma trận ứng suất - biến dạng đàn dẻo. Ma trận này được xác định phụ thuộc vào tính chất chảy dẻo của vật liệu và lịch sử đặt tải. Khi không có biến dạng dẻo thì $[D]_{ep}^*$ trùng với ma trận các hệ số đàn hồi $[D]$.

Với giả thiết thứ 3, theo [54], [75] ma trận $[D]_{ep}^*$ có dạng như sau:

$$[D]_{ep}^* = [D] - [D_p] \quad (2.29)$$

trong đó $[D]$ là ma trận đàn hồi đã biết và $[D_p]$ là ma trận dẻo:

$$[D_p] = \frac{1}{H^*} [P]^T [\bar{D}] \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\bar{\zeta}\}} \right\} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\bar{\zeta}\}} \right\}^T [\bar{D}] [P] \quad (2.30)$$

với:

$$H^* = H_i + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\bar{\zeta}\}} \right\}^T ([\bar{D}] + [\bar{H}_k]) \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\bar{\zeta}\}} \right\}$$

trong đó H_i , $[\bar{H}_k]$ lần lượt là mô đun tái bền và ma trận các hệ số mô đun tái bền và $F(\{\bar{\zeta}\}, \kappa)$ là biểu thức mô tả bề mặt chảy dẻo của vật liệu; còn véc tơ $\{\bar{\zeta}\}$ được xác định bởi $\{\bar{\zeta}\} = \{\bar{\sigma}\} - \{\bar{\alpha}\}$ với $\{\bar{\alpha}\}$, $\{\bar{\sigma}\}$ lần lượt là véc tơ dịch chuyển bề mặt chảy và véc tơ ứng suất 9 thành phần, được định nghĩa theo quan hệ một - một với véc tơ ứng suất 6 thành phần tương ứng được trình bày dưới đây; $[\bar{D}]$ là ma trận cho phép chuyển đổi mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng từ dạng 6 thành phần $(\{\sigma\}, \{\varepsilon\})$ sang dạng 9 thành phần tương ứng $(\{\bar{\sigma}\}, \{\bar{\varepsilon}\})$. Mối quan hệ giữa các ma trận và véc tơ kể trên như sau [54, 75]:

$$\begin{aligned} \{\sigma\} &= \left\{ \sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \sigma_{xy} \quad \sigma_{yz} \quad \sigma_{zx} \right\}^T \\ \{\varepsilon\} &= \left\{ \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad 2\varepsilon_{xy} \quad 2\varepsilon_{yz} \quad 2\varepsilon_{zx} \right\}^T \\ \{\bar{\sigma}\} &= \left\{ \sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \sigma_{xy} \quad \sigma_{yx} \quad \sigma_{yz} \quad \sigma_{zy} \quad \sigma_{zx} \quad \sigma_{xz} \right\}^T \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\{\bar{\varepsilon}\} = \{\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \varepsilon_{xy} \quad \varepsilon_{yx} \quad \varepsilon_{yz} \quad \varepsilon_{zy} \quad \varepsilon_{zx} \quad \varepsilon_{xz}\}^T$$

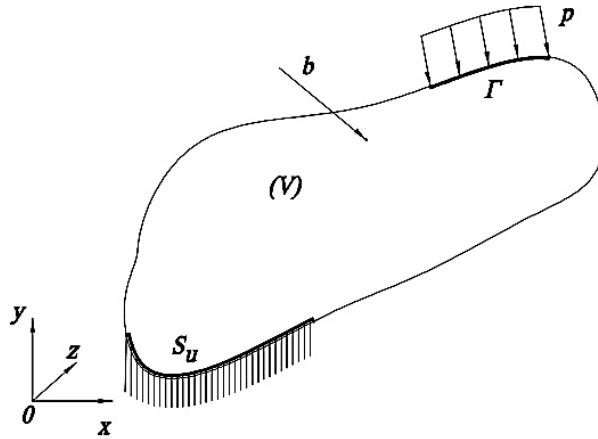
$$\{\sigma\} = [P]^T \{\bar{\sigma}\}$$

$$\{\bar{\varepsilon}\} = [P]\{\varepsilon\}$$

$$[D] = [P]^T [\bar{D}] [P]$$

Các giả thiết và hệ thức dẫn ra ở trên cho phép thiết lập phương trình chuyển động của chi tiết.

Trường hợp tổng quát, chi tiết được xem xét dưới dạng một vật thể chịu lực có thể tích V , bề mặt S , được liên kết chặt trên biên S_u , chịu tải trọng phân bố p trên biên Γ và chịu lực khối b tác dụng tại mỗi điểm trên vật thể như mô tả trên Hình 2. 3.



Hình 2. 3: Vật thể chịu lực.

Theo đó, các chuyển vị và ứng suất phải thỏa mãn các điều kiện biên:

$$u_j + \delta u_j = u_j^p \text{ hay } \delta u_j = 0 \text{ trên biên } S_u \quad (2.32)$$

$$\sigma_{ij} n_i = p_j \text{ trên biên } \Gamma \quad (2.33)$$

trong đó u_j^p là chuyển dịch trên phần biên S_u , p_j là lực phân bố tác dụng trên phần biên Γ , n_i là các cosin chỉ phương của pháp tuyến ngoài của mặt biên Γ tại điểm khảo sát.

Ngoài các điều kiện biên ở trên, khi giải phương trình chuyển động, cần sử dụng thêm các điều kiện đầu ứng với thời điểm $t = 0$:

$$u_j \Big|_{t=0} = u_j^0, \dot{u}_j \Big|_{t=0} = \dot{u}_j^0 \quad (2.34)$$

Để thành lập phương trình chuyển động của chi tiết, chúng ta sử dụng nguyên lý Hamilton [8, 30, 54, 75]. Theo đó:

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta W^d - \delta W_I - \delta W_E) dt = 0 \quad (2.35)$$

trong đó δW_E , δW_I lần lượt là công khả dĩ của ngoại lực và nội lực, còn δW^d là động năng khả dĩ của vật. Các thành phần công khả dĩ trong (2.35) được xác định như sau:

a) Công khả dĩ của ngoại lực được xác định bởi [8, 30, 54, 75]:

$$\delta W_E = - \left(\int_V \rho \{b\}^T \{\delta u\} dV + \int_\Gamma \{p\}^T \{\delta u\} dV \right) \quad (2.36)$$

ở đây ρ là khối lượng riêng của vật liệu, $\{b\}$ là véc tơ lực khối tác dụng tại mỗi điểm trên chi tiết, $\{p\}$ véc tơ tải trọng phân bố trên biên Γ .

Theo phương pháp phần tử hữu hạn, chuyển vị $\{u\}$ của phần tử được tính thông qua chuyển vị nút $\{q\}$ như sau:

$$\{u\} \equiv \begin{Bmatrix} s \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & \dots & N_{nod} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} s_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ w_{nod} \end{Bmatrix} = [N] \{q\} \quad (2.37)$$

trong (2.37), ký hiệu nod chỉ số nút của phần tử, N_i là hàm dạng tại nút i .

Thay (2.37) vào (2.36) ta được:

$$\delta W_E = - \left(\int_V \{\delta q\}^T \rho [N]^T \{b\} dV + \int_\Gamma \{\delta q\}^T [N]^T \{p\} dS \right) = - \{\delta q\}^T \{F\} \quad (2.38)$$

với $\{F\} = \int_V \rho [N]^T \{b\} dV + \int_\Gamma [N]^T \{p\} dS$.

b) Động năng khả dĩ của vật được xác định bởi [8, 30, 54, 75]:

Động năng của chi tiết được xác định theo công thức:

$$W^d = \frac{1}{2} \int_V \rho \{\dot{u}\}^2 dV = \frac{1}{2} \int_V \rho \{\dot{u}\}^T \{\dot{u}\} dV \quad (2.39)$$

với $\{\dot{u}\}$ là véc tơ vận tốc của các điểm thuộc phần tử.

Do véc tơ vận tốc $\{\dot{u}\}$ của các điểm thuộc phần tử có thể biểu diễn qua vận tốc $\{\dot{q}\}$ của các nút dựa theo (2.37) nên ta có:

$$W^d = \frac{1}{2} \int_V \rho \{\dot{u}\}^T \{\dot{u}\} dV = \frac{1}{2} \{\dot{q}\}^T \left(\int_V \rho [N]^T [N] dV \right) \{\dot{q}\} = \frac{1}{2} \{\dot{q}\}^T [M] \{\dot{q}\} \quad (2.40)$$

trong đó $[M] = \int_V \rho [N]^T [N] dV$ là ma trận khối lượng.

Do toán tử biến phân có tính chất giao hoán với các toán tử tích phân và vi phân nên từ công thức (2.40) ta có:

$$\delta \left(\int_{t_1}^{t_2} W^d dt \right) = \delta \left(\int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} \{\dot{q}\}^T [M] \{\dot{q}\} dt \right) = \int_{t_1}^{t_2} \{\delta \dot{q}\}^T [M] \{\dot{q}\} dt \quad (2.41)$$

$$\{\delta \dot{q}\}^T = \frac{d}{dt} (\{\delta q\}^T) \quad (2.42)$$

Thay (2.42) vào (2.41) và thực hiện phép tích phân từng phần ta được:

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} \delta W^d dt &= \int_{t_1}^{t_2} \{\delta \dot{q}\}^T [M] \{\dot{q}\} dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt} (\{\delta q\}^T) [M] \{\dot{q}\} dt = \\ &= \underbrace{\{\delta q\}^T [M] \{\dot{q}\} \Big|_{t_1}^{t_2}}_{=0} - \int_{t_1}^{t_2} \{\delta q\}^T [M] \{\ddot{q}\} dt = - \int_{t_1}^{t_2} \{\delta q\}^T [M] \{\ddot{q}\} dt \end{aligned} \quad (2.43)$$

c) Xác định công khả dĩ của nội lực.

Nếu xét đến sự tồn tại của các lực cản do ma sát trong vật thể và coi các lực cản này tỷ lệ với vận tốc chuyển động thì công khả dĩ của nội lực có thể được tách thành hai thành phần, gồm công khả dĩ do biến dạng δU và công khả dĩ do nội ma sát δU_{ms} :

$$\delta W_I = \delta U + \delta U_{ms} \quad (2.44)$$

Tương tự công khả dĩ của ngoại lực xác định theo (2.38), nếu giả thiết các lực cản tỷ lệ với vận tốc chuyển động thì công khả dĩ do nội ma sát được xác định như sau:

$$\delta U_{ms} = \int_V \{\delta u\}^T \mu \{\dot{u}\} dV = \int_V \mu \{\delta q\}^T [N]^T [N] \{\dot{q}\} dV = \{\delta q\}^T [C] \{\dot{q}\} \quad (2.45)$$

trong đó $[C] = \int_V \mu [N]^T [N] dV$ và μ là hệ số cản.

Công khả dĩ do biến dạng δU được xác định theo công thức:

$$\delta U = \int_V \{\sigma\} \{\delta \varepsilon\} dV \quad (2.46)$$

Công khả dĩ do biến dạng δU có thể được biểu diễn qua chuyển vị. Thừa nhận mối quan hệ giữa biến dạng - chuyển vị tuân theo các phương trình của Green (phi tuyến hình học) [30], ta có:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial s}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial s}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial s}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] \\ 2\varepsilon_{xy} &= \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2.47)$$

$$2\varepsilon_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} + \left(\frac{\partial s}{\partial y} \frac{\partial s}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

$$2\varepsilon_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial s}{\partial z} + \left(\frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial s}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

Có thể xem các thành phần biến dạng ở trên bao gồm hai thành phần tuyến tính $\{\varepsilon_0\}$ và phi tuyến $\{\varepsilon_L\}$:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_0\} + \{\varepsilon_L\} \quad (2.48)$$

trong đó:

$$\{\varepsilon_0\} = \left[\frac{\partial s}{\partial x}; \quad \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \frac{\partial w}{\partial z}; \quad \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right); \quad \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial s}{\partial z} \right); \quad \left(\frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]^T \quad (2.49)$$

$$\{\varepsilon_L\} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \theta_x^T & 0 & 0 & 0 & \theta_z^T & \theta_y^T \\ 0 & \theta_y^T & 0 & \theta_z^T & 0 & \theta_x^T \\ 0 & 0 & \theta_z^T & \theta_y^T & \theta_x^T & 0 \end{bmatrix}^T \begin{Bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} [A]^T \{\theta\} \quad (2.50)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \theta_x^T & 0 & 0 & 0 & \theta_z^T & \theta_y^T \\ 0 & \theta_y^T & 0 & \theta_z^T & 0 & \theta_x^T \\ 0 & 0 & \theta_z^T & \theta_y^T & \theta_x^T & 0 \end{bmatrix}^T; \{\theta\} = \{\theta_x \quad \theta_y \quad \theta_z\} \quad (2.51)$$

$$\{\theta_x\} = \left[\frac{\partial s}{\partial x} \quad \frac{\partial v}{\partial x} \quad \frac{\partial w}{\partial x} \right]^T, \{\theta_y\} = \left[\frac{\partial s}{\partial y} \quad \frac{\partial v}{\partial y} \quad \frac{\partial w}{\partial y} \right]^T, \{\theta_z\} = \left[\frac{\partial s}{\partial z} \quad \frac{\partial v}{\partial z} \quad \frac{\partial w}{\partial z} \right]^T \quad (2.52)$$

Ma trận $[A]$ và véc tơ $\{\theta\}$ xác định theo các biểu thức (2.51) và (2.52) có đặc điểm:

$$(\delta[A])\{\theta\} = [A](\delta\{\theta\}) \quad (2.53)$$

vì vậy:

$$\delta\{\varepsilon_L\} = \frac{1}{2} (\delta[A])\{\theta\} + \frac{1}{2} [A]\delta\{\theta\} = [A]\delta\{\theta\} \quad (2.54)$$

Do hệ thức (2.37) nên ta có thể viết:

$$\{\theta\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial s}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial w}{\partial x} \\ \vdots \\ \frac{\partial w}{\partial z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{\partial N_{nod}}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \dots & 0 & 0 & \frac{\partial N_{nod}}{\partial x} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial z} & 0 & \dots & 0 & 0 & \frac{\partial N_{nod}}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} s_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ s_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_{nod} \end{Bmatrix} = [H]\{q\} \quad (2.55)$$

Thay biểu thức của $\{\theta\}$ theo (2.55) vào (2.54) ta được:

$$\delta\{\varepsilon_L\} = [A][H]\{\delta q\} = [B_L]\{\delta q\} \quad (2.56)$$

trong đó:

$$[B_L] = [A][H]$$

Phân biến dạng có quan hệ tuyến tính với chuyển vị $\{\varepsilon_0\}$ có thể được biểu diễn qua véc tơ chuyển vị nút như sau [30, 54]:

$$\{\varepsilon_0\} = [B_0]\{q\} \quad (2.57)$$

trong đó:

$$[B_0] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}^T [N]$$

Thay (2.50) và (2.57) vào (2.46) ta nhận được biểu thức của công khả dĩ do biến dạng:

$$\delta U = \int_V \{\delta q\}^T \left([B_0]^T + [B_L]^T \right) \{\sigma\} dV \quad (2.58)$$

Sử dụng các kết quả (2.38), (2.40), (2.45) và (2.58) vào (2.35) ta nhận được:

$$\int_{t_1}^{t_2} \{\delta q\}^T \left(-[M]\{\ddot{q}\} - [C]\{\dot{q}\} - \int_V \left([B_0]^T + [B_L]^T \right) \{\sigma\} dV + \{F\} \right) dt = 0 \quad (2.59)$$

Do hệ thức (2.59) thỏa mãn với mọi khoảng tích phân theo thời gian từ t_1 đến t_2 và với biến phân $\{\delta q\}^T$ tùy ý nên ta phải có:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + \int_V \left([B_0]^T + [B_L]^T \right) \{\sigma\} dV = \{F\} \quad (2.60)$$

Phương trình (2.60) là phương trình vi phân dao động của kết cấu mô tả quá trình VSR. Sự thay đổi trường ứng suất trong kết cấu có liên quan đến số hạng thứ 3 trong vế trái của phương trình.

Do các yếu tố phi tuyến hình học và vật liệu nên phương trình (2.60) chỉ có thể được giải ở dạng gia số. Phương trình dạng gia số được thành lập bằng cách xét hai trạng thái cân bằng động I và II ở hai thời điểm lân cận t và $t+\Delta t$, trong đó Δt là khoảng thời gian đủ nhỏ:

$$[M]\{\Delta \ddot{q}\} + [C]\{\Delta \dot{q}\} + \{\Delta f\}_{in} = \{\Delta F\} \quad (2.61)$$

trong đó:

$$\{\Delta f\}_{in} = \int_V \Delta \left([B_0]^T + [B_L]^T \right) \{\sigma\} dV + \int_V \left([B_0]^T + [B_L]^T \right) \{\Delta \sigma\} dV \quad (2.62)$$

Do các ma trận $[B_0]$, $[B_L]$ đã được định nghĩa theo (2.57) và (2.56) nên chúng ta cần biểu diễn đại lượng $\{\Delta \sigma\}$ trong (2.62) qua véc tơ gia số chuyển vị nút $\{\Delta q\}$. Theo các hệ thức (2.28) và (2.29) ta có:

$$\{\Delta \sigma\} = [D_{ep}^*] \{\Delta \varepsilon\} = ([D] - [D_p])([B_0] + [B_L])\{\Delta q\} \quad (2.63)$$

Với (2.63), công thức (2.62) có thể được viết dưới dạng:

$$\{\Delta f\}_{in} = ([K_0] + [K_L] + [K_\sigma] - [K_R])\{\Delta q\} \quad (2.64)$$

trong đó:

$$[K_0] = \int_V [B_0^T][D][B_0] dV$$

$$[K_L] = \int_V ([B_0^T][D][B_L] + [B_L^T][D][B_L] + [B_L^T][D][B_0])dV$$

$$[K_\sigma] = \int_V [\Delta B_L^T] \{\sigma\} dV$$

$$[K_R] = \int_V ([B_0^T] + [B_L^T])[D_p]([B_0] + [B_L])dV.$$

Trong công thức (2.64), $[K_0]$ là ma trận độ cứng liên quan đến hình dạng của chi tiết, $[K_\sigma]$ là ma trận độ cứng do USD; $[K_L]$ là ma trận độ cứng thể hiện chuyển vị lớn, còn $[K_R]$ là ma trận độ cứng hiệu chỉnh do tải (load correction matrix).

Thay (2.64) vào (2.61) ta nhận được phương trình vi phân dao động của chi tiết trong quá trình rung khử ứng suất dư dưới dạng gia số:

$$[M]\{\Delta \ddot{q}\} + [C]\{\Delta \dot{q}\} + ([K_0] + [K_L] + [K_\sigma] - [K_R])\{\Delta q\} = \{\Delta F\}$$

Hay:

$$[M]\{\Delta \ddot{q}\} + [C]\{\Delta \dot{q}\} + [K_T]\{\Delta q\} = \{\Delta F\} \quad (2.65)$$

ở đây đã đặt $[K_T] = [K_0] + [K_L] + [K_\sigma] - [K_R]$.

Phương trình (2.65) thể hiện cả tính phi tuyến hình học (trong quan hệ giữa biến dạng và chuyển vị) và tính phi tuyến vật lý (do quá trình rung khử diễn ra ở cả hai giai đoạn đàn hồi và dẻo). Véc tơ gia số tải $\{\Delta F\}$ liên quan đến lực quán tính phát sinh trong quá trình rung khử được xác định qua các tham số thể hiện chế rung.

2.1.4. Sơ đồ tính toán, mô phỏng rung khử ứng suất dư.

Phương trình (2.65) là phi tuyến nên luận án sử dụng phương pháp tích phân trực tiếp Newmark kết hợp phương pháp lặp Newton - Raphson. để giải.

Theo phương pháp tích phân trực tiếp Newmark, với mỗi bước thời gian Δt , tiến hành tính các đại lượng sau [1]:

Gán điều kiện đầu:

$$\{q\}_0 = 0; \{\dot{q}\}_0 = 0 \quad (2.66)$$

Tính các ma trận:

$$[\bar{K}_T] = [K_T] + \frac{[M]}{\beta \Delta t^2} + \frac{\gamma [C]}{\beta \Delta t} \quad (2.67)$$

$$\{\Delta \bar{F}\} = \{\Delta F\} + \left(\frac{\{\dot{q}_n\}}{\beta \Delta t} + \frac{\{\ddot{q}_n\}}{2\beta} \right) [M] + \left(\frac{\gamma \{\dot{q}_n\}}{\beta} + \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \{\ddot{q}_n\} \Delta t \right) [C] \quad (2.68)$$

với Δt là bước thời gian, còn β và γ là các hằng số sai phân.

Gia số chuyển vị trong mỗi bước tính tích phân trực tiếp:

$$\{\Delta q\} = \frac{\{\Delta \bar{F}\}}{[\bar{K}_T]} \quad (2.69)$$

Tuy nhiên với gia số chuyển vị tính được theo (2.69) có sai số lớn, để kết quả chính xác hơn, gia số chuyển vị trong mỗi một bước thời gian được tính đúng dần theo phương pháp lặp Newton – Raphson. Theo đó, trong các vòng lặp đại lượng $[\bar{K}_T]$ tại đầu mỗi vòng lặp được giữ không đổi. Gia số lực được tính lại, do vậy một lượng gia số chuyển vị được tính thêm sau mỗi vòng lặp, vòng lặp kết thúc khi lượng gia số chuyển vị tính thêm sau một vòng lặp là nhỏ hơn một giá trị định trước ε_D . Khi đó gia số vận tốc được tính theo công thức:

$$\{\Delta \dot{q}\} = \frac{\gamma \{\Delta q\}}{\beta \Delta t} - \frac{\gamma \{\dot{q}_n\}}{\beta} - \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \{\ddot{q}_n\} \quad (2.70)$$

Chuyển vị, vận tốc và gia tốc tại bước $n+1$ được tính như sau:

$$\{q_{n+1}\} = \{q_n\} + \{\Delta q\} \quad (2.71)$$

$$\{\dot{q}_{n+1}\} = \{\dot{q}_n\} + \{\Delta \dot{q}\} \quad (2.72)$$

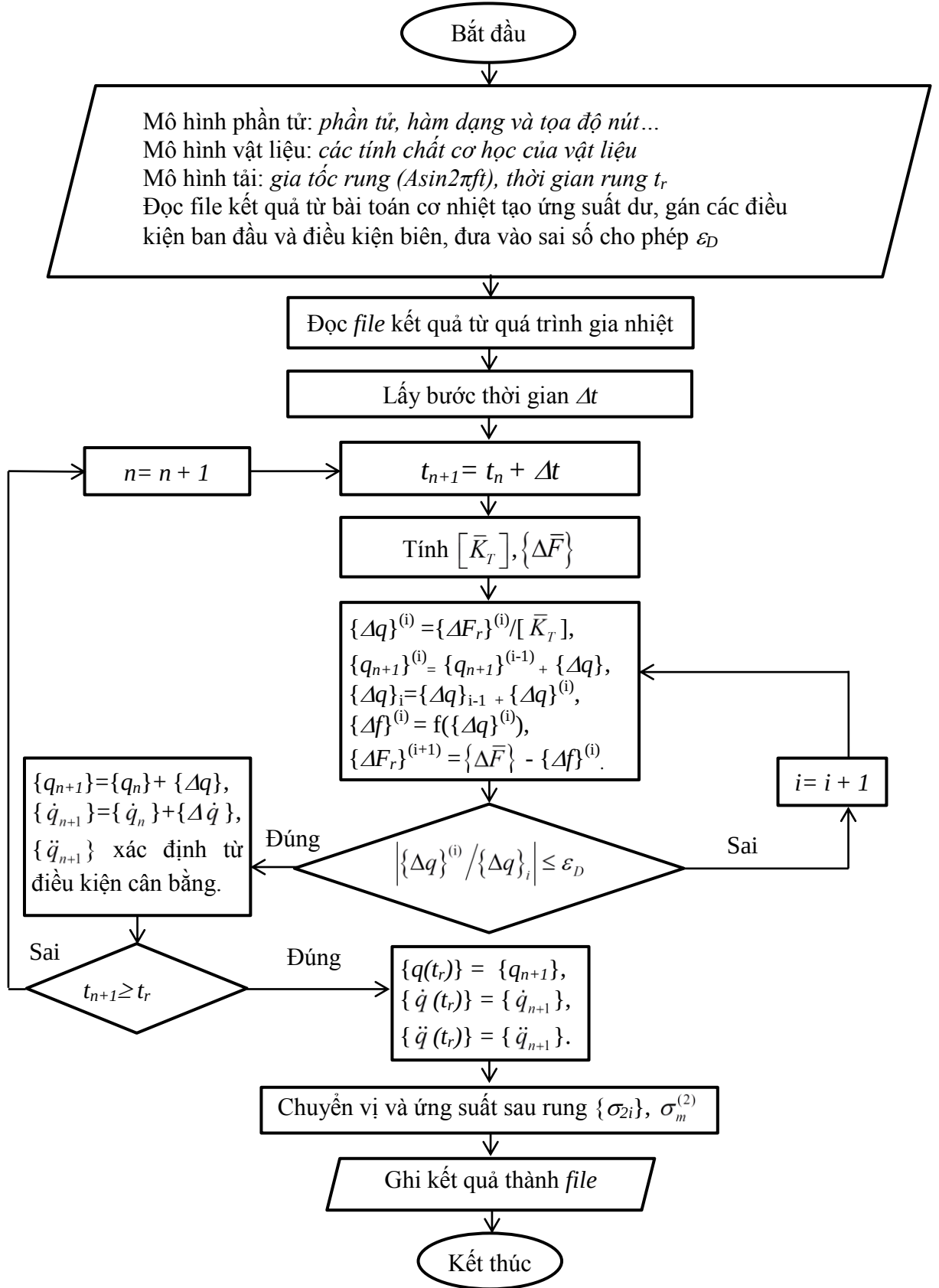
$$\{\ddot{q}_{n+1}\} = \frac{\{F_{n+1}\} - [C_{n+1}]\{\dot{q}_{n+1}\} - [K_{n+1}]\{q_{n+1}\}}{[M]} \quad (2.73)$$

Tóm tắt thuật toán gồm các bước chính sau:

1. Lập các ma trận $[M]$, $[C]$, $[K_T]$ tại thời điểm ban đầu.
2. Gán điều kiện đầu theo (2.66).
3. Sử dụng phương pháp tích phân gia tốc trung bình: $\beta=1/4$; $\gamma=1/2$.
4. Tính các ma trận $[\bar{K}_T]$, $\{\Delta\bar{F}\}$ theo các biểu thức (2.67) và (2.68).
5. Thực hiện các vòng lặp để tính gia số chuyển vị $\{\Delta q\}$ theo (2.69).
6. Tính gia số vận tốc $\{\Delta\dot{q}\}$ theo công thức (2.70).
7. Tính chuyển vị, vận tốc, gia tốc tại thời điểm $n+1$ lần lượt theo các công thức (2.27), (2.72) và (2.73).

Sơ đồ khối của thuật toán trên được thể hiện như trên Hình 2. 4.

.



Hình 2. 4: Sơ đồ tính toán ứng suất dư sau quá trình rung khử

2.2. Xác định các đặc trưng bền mỏi của chi tiết sau rung khử ứng suất dư

Mỏi của vật liệu là quá trình tích lũy từ từ các hỏng hóc trong vật liệu dưới tác động của ứng suất (hoặc biến dạng) thay đổi lặp lại, gây ra sự thay đổi về cấu trúc và tính chất của vật liệu, dẫn đến hình thành và phát triển vết nứt và cuối cùng gây phá hủy chi tiết. Sự phá hủy chi tiết xảy ra ngay cả khi biên độ ứng suất tác động lên chi tiết còn rất nhỏ so với giới hạn bền của nó, vì vậy vật liệu dùng để chế tạo chi tiết chịu tải chu kỳ cần phải xác định được các đặc trưng bền mỏi như giới hạn bền mỏi, tuổi thọ mỏi...

2.2.1. Cơ sở xác định giới hạn bền mỏi.

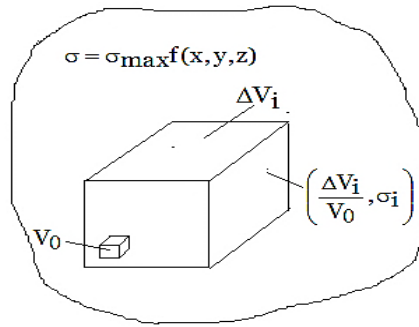
Giới hạn bền mỏi của vật liệu hay kết cấu là giá trị ứng suất lớn nhất mà mẫu hoặc chi tiết có thể chịu đựng được với số chu trình ứng suất không hạn định và với xác suất không bị phá hỏng qui định [6]. Trong tính toán lý thuyết hay thực nghiệm, để xác định giới hạn bền mỏi, thông thường người ta lấy khoảng thời gian làm việc của chi tiết là $10^6 \div 10^8$ chu kỳ thay đổi ứng suất, tùy thuộc vào loại vật liệu, hình dạng của chi tiết.

Tìm trực tiếp giới hạn bền mỏi của chi tiết là công việc hết sức khó khăn, mất nhiều thời gian và công sức. Do vậy, đã có rất nhiều phương pháp gián tiếp được đề xuất để tìm giới hạn bền mỏi của chi tiết đơn giản và thuận tiện hơn. Một trong các phương pháp gián tiếp mà luận án sẽ nghiên cứu và phát triển là phương pháp số trên cơ sở mô hình phá hủy giòn - mô hình chuỗi các khâu liên kết nối tiếp nhau, chuỗi sẽ bị phá hủy tại khâu yếu nhất do Weibull đề xuất [67].

Theo phương pháp này, giới hạn bền mỏi của chi tiết cần xác định sẽ được tính thông qua giới hạn bền mỏi của mẫu được chế tạo từ cùng một loại vật liệu. Giống như phương pháp đồng dạng phá hủy mỏi, phương pháp số được xây dựng trên cơ sở xác suất phá hủy của chuỗi các khâu nối tiếp nhau.

Theo Weibull, có thể xem vật thể là tập hợp của nhiều phần thể tích ΔV_i nối tiếp nhau có mức ứng suất σ_i không đổi, mỗi thể tích ΔV_i lại chứa n_i khâu có thể tích đơn vị V_0 nối tiếp nhau như minh họa trên Hình 2. 5.

Giá trị $\sigma_{\max}$ trên Hình 2. 5 là ứng suất lớn nhất đặt tại một điểm nào đó trong chi tiết; $f(x_i, y_i, z_i)$ là hàm tọa độ không thứ nguyên, có thể xác định được khi biết trường ứng suất trong thể tích khảo sát.



Hình 2. 5: Chia vật thể theo mô hình phá hủy giòn của Weibull.

Mối quan hệ giữa ứng suất σ_i trong thể tích ΔV_i và hàm $f(x_i, y_i, z_i)$ được thể hiện qua công thức:

$$\sigma_i = \sigma_{\max} \cdot f(x_i, y_i, z_i) \quad (2.74)$$

Theo tài liệu [77, 78, 81], xác suất phá hủy chi tiết chịu ứng suất lớn nhất $\sigma_{\max}$ được tính theo công thức:

$$P_{\parallel_{\sigma_i \geq u_w}} = 1 - \exp \left(- \int_{V_u} \left(\frac{\sigma_{\max} f(x_i, y_i, z_i) - u_w}{\sigma_w} \right)^{m_w} \frac{dV}{V_0} \right) \quad (2.75)$$

trong đó u_w – giá trị nhỏ nhất của ứng suất có thể gây tổn thất mỗi tích lũy cho chi tiết (thường lấy $u_w = 0$); σ_w là thông số liên quan đến quy luật phân bố xác suất Weibull có thể tra trong các bảng tiêu chuẩn tùy thuộc vào giá trị của hai đại lượng u_w và m_w ; m_w là tham số được tính theo công thức sau [79]:

$$m_w = \frac{1}{V_\sigma} - 0,64 \quad (2.76)$$

ở đây ν_σ là một các đặc trưng cơ học của vật liệu, thể hiện độ nhạy của vật liệu đối với tập trung ứng suất và kích thước chi tiết; giá trị của ν_σ cũng được tra trong các bảng thuộc hệ thống tiêu chuẩn tùy theo loại vật liệu cụ thể.

Theo Kogaev [78], hai chi tiết (kể cả chi tiết và mẫu) được xem là đồng dạng về phá hủy mỗi khi có cùng giá trị của đại lượng:

$$I = \int_{V_u} \left(\frac{\sigma_{\max} f(x_i, y_i, z_i) - u_w}{\sigma_w} \right)^{m_w} \frac{dV}{V_0} \quad (2.77)$$

Theo tài liệu [80], giới hạn bền mỗi của chi tiết chịu tải thay đổi theo quy luật đối xứng được xác định theo công thức:

$$\sigma_{-1} = \sigma_w \left(\frac{V_0}{V} \right)^{\frac{1}{m_w}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{m_w} \right) \quad (2.78)$$

trong đó σ_{-1} , V là giới hạn mỗi và thể tích quy đổi của chi tiết, $V = \int_V [f(x, y, z)]^{m_w} dV$, $\Gamma(.)$ là hàm Gama.

Trong trường hợp chi tiết hoặc kết cấu chịu tải trọng thay đổi theo quy luật không đối xứng, hoặc trường hợp tồn tại USD thì giá trị của ứng suất trung bình khác 0. Để kể tới ảnh hưởng của ứng suất trung bình trong chu kỳ tải đến giới hạn bền mỗi, Goodman đã đề xuất biểu thức sau [38]:

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_B} = 1 \quad (2.79)$$

trong đó σ_B - giới hạn bền của vật liệu, σ_R - giới hạn mỗi của chi tiết ở chu trình ứng suất phi đối xứng có ứng suất trung bình là σ_m , σ_{-1} - giới hạn bền mỗi của chi tiết ở chu trình ứng suất đối xứng.

Từ biểu thức (2.79) ta có thể xác định giới hạn mỗi trong trường hợp ứng suất bất đối xứng thông qua giới hạn bền mỗi ở chu trình đối xứng như sau [38]:

$$\sigma_R = \frac{\sigma_B - \sigma_m}{\sigma_B} \sigma_{-1} \quad (2.80)$$

Thay biểu thức (2.78) vào (2.80) ta nhận được biểu thức xác định giới hạn bền mỗi của chi tiết ở chu trình ứng suất phi đối xứng (chi tiết tồn tại USD) như sau:

$$\sigma_R = \sigma_{-1} \frac{\sigma_B - \sigma_m}{\sigma_B} = \sigma_w \frac{\sigma_B - \sigma_m}{\sigma_B} \left(\frac{V_0}{V} \right)^{\frac{1}{m_w}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{m_w} \right) \quad (2.81)$$

2.2.2. Phương pháp số xác định sự thay đổi giới hạn bền mỗi của chi tiết sau rung khử ứng suất dư.

Mục 2.2.1 đã đưa ra công thức (2.81) cho phép ta xác định giới hạn bền mỗi của chi tiết khi tồn tại USD. Tuy nhiên, với các chi tiết có hình dạng và trường ứng suất phức tạp thì việc tìm giới hạn bền mỗi là rất khó khăn do rất khó xác định các thông số thể tích qui đổi V bằng phương pháp giải tích. Hơn nữa, quá trình VSR làm cho USD trong chi tiết thay đổi kể cả về sự phân bố lẫn giá trị độ lớn, chính điều này làm cho các đặc trưng bền mỗi của chi tiết thay đổi, trong đó có giới hạn bền mỗi. Việc đánh giá mức thay đổi giới hạn bền mỗi của chi tiết sau quá trình VSR cần phải tính tới.

Trên cơ sở mô hình phá hủy giòn và sự đồng dạng phá hủy mỗi, Luận án đề xuất một phương pháp phần tử hữu hạn để tính mức thay đổi giới hạn bền mỗi của chi tiết một cách nhanh chóng, dễ dàng và chính xác.

Để đạt được mục đích trên ta viết công thức xác định giới hạn bền mỗi (2.81) của chi tiết hoặc kết cấu cho hai trường hợp trước và sau VSR (sử dụng các chỉ số tương ứng 1 và 2) rồi chia hai vế các phương trình cho nhau, thì kết quả nhận được:

$$\frac{\sigma_R^{(2)}}{\sigma_R^{(1)}} = \frac{\sigma_B - \sigma_m^{(2)}}{\sigma_B - \sigma_m^{(1)}} \left(\frac{V^{(1)}}{V^{(2)}} \right)^{\frac{1}{m_w}} \quad (2.82)$$

Các thể tích qui đổi $V^{(j)}$ ($j=1, 2$) có thể tính gần đúng bằng phương pháp phần tử hữu hạn như sau [82]:

$$V^{(j)} = \sum_{m=1}^{N_e} V_{ELm}^{(j)} \quad (2.83)$$

trong đó N_e là số lượng các phần tử hữu hạn được sử dụng để mô hình hóa mẫu và chi tiết, $V_{ELm}^{(j)}$ là thể tích qui đổi của phần tử thứ m . Với phần tử dạng 3 chiều, $V_{ELm}^{(j)}$ được xác định nhờ công thức tích phân theo phương pháp cầu phương Gauss như sau [82]:

$$\begin{aligned} V_{ELm}^{(j)} &= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(f^{(j)}(x, y, z) \right)^{m_w} \det(J_m) d\zeta d\eta d\tau \\ &= \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 W_i W_k W_l \left(f^{(j)}(x, y, z) \right)^{m_w} \det(J_m) \end{aligned} \quad (2.84)$$

với W_i, W_k, W_l là các trọng số Gauss theo các trục ζ, η, τ trong hệ trục tọa độ địa phương của phần tử; J_m là ma trận Jacobi trong phép chuyển đổi véc tơ từ hệ tọa độ đề-các (x, y, z) sang hệ tọa độ địa phương ζ, η, τ và $f^{(j)}(x, y, z)$ là hàm tọa độ không thứ nguyên được xác định bởi:

$$f^{(j)}(x, y, z) = \sum_{i=1}^{nod} \left(N_i \frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} \right)^{(j)} \quad (2.85)$$

Công thức (2.82) là cơ sở cho phép ta đánh giá mức độ thay đổi giới hạn bền mới của chi tiết hoặc kết cấu sau quá trình rung khử USD.

2.2.3. Xác định mức thay đổi tuổi thọ mới của chi tiết sau rung khử ứng suất dư.

Tuổi thọ mới của vật liệu (chi tiết) là khoảng thời gian làm việc của chúng dưới tác động của một chế độ tải động và các yếu tố ảnh hưởng khác cho tới khi bị phá hủy. Tuổi thọ mới thường được tính theo số chu kỳ tải hoặc theo thời gian.

Để đánh giá tuổi thọ mới của kết cấu khi kể đến ảnh hưởng của quá trình VSR, ta sử dụng mô hình tích lũy tổn thất mới tuyến tính do Miner đề xuất [46, 76, 79, 83]. Ở đây, USD đóng vai trò ứng suất ban đầu trong chi tiết và là

ứng suất trung bình trong mỗi chu kỳ chịu tải của chi tiết.

Tuổi thọ mỗi của kết cấu liên quan tới khái niệm tích lũy tổn thất mỗi. Tổng tích lũy tổn thất mỗi đối với chi tiết khi được xử lý VSR và khi không được khử USD lần lượt được xác định theo các công thức sau:

$$D_1 = D_{\sigma m1} \quad (2.86)$$

$$D_2 = D_r + D_{\sigma m2} \quad (2.87)$$

trong đó D_r là tổn thất mỗi do VSR; $D_{\sigma m1}$ là tổn thất mỗi trong quá trình làm việc mà không được khử USD với ứng suất trung bình ứng trong mỗi chu kỳ chịu tải là $\sigma_m^{(1)}$; $D_{\sigma m2}$ là tổn thất mỗi trong quá trình làm việc sau khi được USD với ứng suất trung bình trong mỗi chu kỳ chịu tải là $\sigma_m^{(2)}$.

Giá trị của D_r , $D_{\sigma m1}$ và $D_{\sigma m2}$ được xác định bởi [46]:

$$D_r = \sum_{i=1}^{n_R} \frac{n_i}{N_i} \quad (2.88)$$

$$D_{\sigma m1} = \sum_{i=1}^{n_A} \frac{n_{i\sigma m1}}{N_{i\sigma m1}} = \lambda_{\sigma m1} D_{\sigma m1}^b \quad (2.89)$$

$$D_{\sigma m2} = \sum_{i=1}^{n_A} \frac{n_{i\sigma m2}}{N_{i\sigma m2}} = \lambda_{\sigma m2} D_{\sigma m2}^b \quad (2.90)$$

Trong các công thức trên, n_i là số chu trình ứng suất ở mức tải thứ i trong quá trình rung khử, N_i là số chu kỳ tới phá hủy tính theo đường cong mỏi ứng với ứng suất ở mức i trong quá trình rung khử (lấy theo các tiêu chuẩn ABS [10], DNV [19], IIW [35],...); n_R là số biên độ ứng suất khác nhau trong quá trình VSR; $N_{i\sigma m1}$, $N_{i\sigma m2}$ lần lượt là số chu kỳ tới phá hỏng theo đường cong mỏi khi biên độ ứng suất ở mức i với ứng suất trung bình lần lượt là $\sigma_m^{(1)}$ (USD sinh ra trong kết cấu hàn mà không được xử lý rung khử) và $\sigma_m^{(2)}$ (USD còn lại trong kết cấu sau khi được rung khử); $n_{i\sigma m1}$, $n_{i\sigma m2}$ lần lượt là số chu trình ứng

suất ở mức ứng suất khác nhau trong quá trình kết cấu làm việc; n_A là số giá trị khác nhau của biên độ ứng suất trong quá trình làm việc của chi tiết; $D_{\sigma m1}^b$, $D_{\sigma m2}^b$ là các tổn thất mỗi của hai chi tiết sau một block tải (tập hợp các giá trị ứng suất thay đổi liên tiếp nhau xuất hiện trong chi tiết sau một chu kỳ vận hành các đặc trưng nào đó, như một ca làm việc, một chuyến bay...); $\lambda_{\sigma m1}$, $\lambda_{\sigma m2}$ là số block tải tương ứng.

Tổn thất mỗi trong mỗi block tải được tính như sau:

$$D_{\sigma m1}^b = \sum_{j=1}^{n_a} \frac{n_{j\sigma m1}}{N_{j\sigma m1}}, \quad D_{\sigma m2}^b = \sum_{j=1}^{n_a} \frac{n_{j\sigma m2}}{N_{j\sigma m2}} \quad (2.91)$$

ở đây, ý nghĩa của các đại lượng $n_{j\sigma m1}$, $n_{j\sigma m2}$, $N_{j\sigma m1}$, $N_{j\sigma m2}$ cũng tương tự như trong các công thức (2.89), (2.90). Tuy nhiên, n_a được tính chỉ trong một block tải.

Trong quá trình làm việc, chi tiết được xem là bị phá hỏng vì mỗi khi tổng tích lũy tổn thất mỗi bằng 1 [76, 79, 83]. Lúc đó, các công thức (2.86) và (2.87) cho ta:

$$D_1 = D_{\sigma m1} = 1 \quad (2.92)$$

$$D_2 = D_r + D_{\sigma m2} = 1 \quad (2.93)$$

Thay (2.89), (2.90) vào (2.92) và (2.93) rồi rút ra:

$$\lambda_{\sigma m1} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_a} \frac{n_{j\sigma m1}}{N_{j\sigma m1}}}, \quad \lambda_{\sigma m2} = \frac{(1 - D_r)}{\sum_{i=1}^{n_a} \frac{n_{j\sigma m2}}{N_{j\sigma m2}}} \quad (2.94)$$

Như vậy, tuổi thọ mỗi của chi tiết được xác định theo số chu trình như sau:

$$\bar{N}_1 = \lambda_{\sigma m1} \cdot \sum_{j=1}^{n_a} n_j, \quad \bar{N}_2 = \lambda_{\sigma m2} \cdot \sum_{j=1}^{n_a} n_j \quad (2.95)$$

Thay (2.94) vào (2.95) ta nhận được các công thức tính tuổi thọ mỗi trong hai trường hợp có và không VSR:

$$\bar{N}_1 = \frac{\sum_{j=1}^{n_a} n_{j\sigma m1}}{\sum_{j=1}^{n_a} \frac{n_{j\sigma m1}}{N_{j\sigma m1}}}, \quad \bar{N}_2 = (1 - D_r) \frac{\sum_{j=1}^{n_a} n_{j\sigma m2}}{\sum_{j=1}^{n_a} \frac{n_{j\sigma m2}}{N_{j\sigma m2}}} \quad (2.96)$$

Số chu kỳ tới phá hủy $N_{i\sigma m1}$, $N_{i\sigma m2}$ được xác định theo đường cong mỏi ở dạng đã được hiệu chỉnh nhằm kể đến ảnh hưởng của ứng suất trung bình $\sigma_m^{(1)}$, $\sigma_m^{(2)}$. Từ phương trình của đường cong mỏi ta nhận được:

$$N_{i\sigma mj} = \frac{C}{(\sigma_{-1i})^m} \quad (2.97)$$

trong đó σ_{-1i} được xác định theo giả thuyết của Goodman [38]:

$$\sigma_{-1i} = \frac{\sigma_{ai}}{1 - \sigma_m^{(j)} / \sigma_B}$$

Khi đó công thức (2.97) trở thành:

$$N_{i\sigma mj} = C \frac{(1 - \sigma_m^{(j)} / \sigma_B)^m}{(\sigma_{ai})^m} \quad (2.98)$$

ở đây $\sigma_m^{(j)}$ ($j = 1, 2$) là ứng suất trung bình (cũng là USD trong chi tiết khi không được khử ứng suất dư) và khi được khử ứng suất dư; σ_{ai} là biên độ ứng suất trong chu kỳ chịu tải thứ i .

Xét trường hợp riêng khi chi tiết làm việc chỉ ở một bậc tải (thay đổi điều hòa), các công thức trong (2.96) trở thành:

$$\bar{N}_1 = N_{\sigma m1} = \frac{C(1 - \sigma_m^{(1)} / \sigma_B)^m}{(\sigma_{ai})^m} \quad (2.99)$$

$$\bar{N}_2 = (1 - D_r) N_{\sigma m2} = (1 - D_r) \frac{C(1 - \sigma_m^{(2)} / \sigma_B)^m}{(\sigma_{ai})^m} \quad (2.100)$$

Để so sánh tuổi thọ của chi tiết trước và sau VSR, tải hay biên độ tải σ_{ai} mà chi tiết phải chịu trong hai trường hợp phải như nhau. Khi đó, từ (2.99) và

(2.100) ta suy ra:

$$\frac{\bar{N}_2}{\bar{N}_1} = (1 - D_r) \left(\frac{1 - \sigma_m^{(2)} / \sigma_B}{1 - \sigma_m^{(1)} / \sigma_B} \right)^m \quad (2.101)$$

Mặt khác, theo Whohler [13], khi tải rung là tuần hoàn với biên độ ứng suất rung khủ là σ_r , số chu kỳ rung khủ là n_r , biểu thức của D_r theo (2.88) là:

$$D_r = \frac{n_r \sigma_r^m}{C} \quad (2.102)$$

Khi đó, hệ thức (2.101) trở thành:

$$\frac{\bar{N}_2}{\bar{N}_1} = \left(1 - \frac{n_r \sigma_r^m}{C} \right) \left(\frac{1 - \sigma_m^{(2)} / \sigma_B}{1 - \sigma_m^{(1)} / \sigma_B} \right)^m \quad (2.103)$$

Các công thức (2.101), (2.103) cho phép đánh giá mức tăng tuổi thọ mỗi của chi tiết có VSR so với khi không khủ USD.

2.2.4. Sơ đồ tính mức thay đổi các đặc trưng bền mỗi của chi tiết sau rung khủ ứng suất dư

Trên cơ sở các công thức (2.82) và (2.103), có thể đưa ra sơ đồ tính toán mức thay đổi các đặc trưng bền mỗi của chi tiết sau VSR

Tóm tắt thuật toán gồm các bước chính sau:

1. Nhập các số liệu về mô hình phần tử, tọa độ nút, các đặc trưng vật liệu, các hệ số đường cong mỗi và tham số trong chế độ rung khủ.

2. Đọc file kết quả trường ứng suất dư do gia nhiệt và trường ứng suất sau rung khủ ứng suất dư.

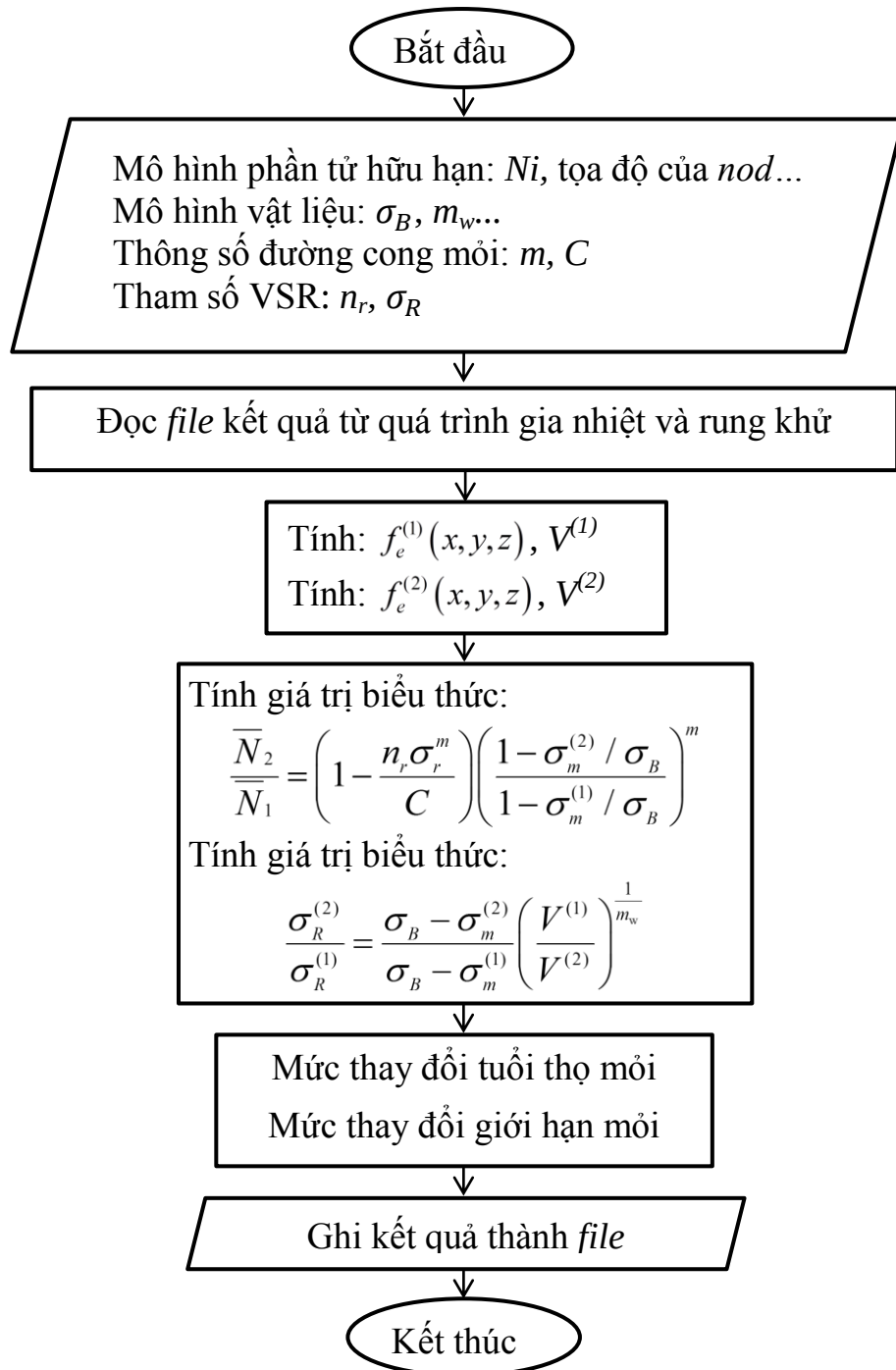
3. Tính hàm $f^{(j)}(x,y,z)$ theo (2.85), tính $V_{ELm}^{(j)}$ theo (2.84) và tính $V^{(j)}$ theo qui tắc ghép phần tử cho toàn bộ chi tiết.

4. Tính mức thay đổi giới hạn bền mỗi $\frac{\sigma_R^{(2)}}{\sigma_R^{(1)}}$ của chi tiết sau VSR so với trước VSR theo công thức (2.82).

5. Tính mức thay đổi tuổi thọ mỗi $\frac{\bar{N}_2}{\bar{N}_1}$ của chi tiết sau VSR so với trước

VSR theo công thức (2.103).

Sơ đồ khối của thuật toán trên được thể hiện như trên Hình 2. 6.



Hình 2. 6: Sơ đồ tính toán tính mức thay đổi các đặc trưng bền mỏi

Kết luận chương 2

Trên cơ sở lý thuyết của các lĩnh vực toán, cơ, nhiệt cho phép mô tả bản chất vật lý của các quá trình truyền nhiệt - biến dạng, đàn - dẻo, phá hủy giòn của chi tiết đã biết, chương này của luận án đã đạt được những kết quả cụ thể như sau:

1. Đã xây dựng được mô hình toán học mô tả sự hình thành USD do quá trình gia nhiệt và hệ phương trình vi phân dạng gia số mô tả dao động của chi tiết có USD trong quá trình rung khử đây là cơ sở để khảo sát ảnh hưởng của các thông số công nghệ rung khử đến hiệu quả VSR sẽ được đề cập đến các chương tiếp theo.

2. Xây dựng được các công thức cho phép đánh giá khả năng thay đổi các đặc trưng bền mỏi của chi tiết khi được VSR.

3. Trên cơ sở các công thức và mô hình toán học đã thiết lập, luận án đã lập sơ đồ tính toán phục vụ việc xây dựng các chương trình tính toán, mô phỏng số trong các môi trường ANSYS và MatLab.

Các kết quả nghiên cứu của chương này được thể hiện trong các bài báo số 1, 2 trong danh mục công trình đã công bố của luận án.

Chương 3

MÔ PHỎNG RUNG KHỬ ỨNG SUẤT DƯ VÀ TÍNH MỨC THAY ĐỔI CÁC ĐẶC TRƯNG MỎI CỦA CHI TIẾT SAU RUNG KHỬ

Chương 2 đã thiết lập hệ phương trình mô tả dao động của chi tiết có USD và xây dựng các công thức tính mức thay đổi các đặc trưng sức bền mỏi của chi tiết khi kể tới ảnh hưởng của quá trình rung khử USD. Trên cơ sở các phương trình và công thức đó, chương này sẽ hiện thực hóa việc mô phỏng quá trình VSR và tính mức thay đổi các đặc trưng mỏi cho một chi tiết mẫu với các thông số đầu vào và điều kiện biên cụ thể. Các kết quả mô phỏng và tính toán được dùng để khảo sát ảnh hưởng của các tham số rung khử đến các khả năng giảm USD và cải thiện các đặc trưng bền mỏi của chi tiết, từ đó đưa ra các khuyến cáo phù hợp cho công nghệ rung khử USD. Các nội dung chính được trình bày trong chương này bao gồm:

- Xây dựng chương trình nhúng trong môi trường ANSYS để mô phỏng USD do quá trình gia nhiệt và quá trình VSR (chương trình có tên gọi là FEM - Thermalstress - Vibration). Kết quả nhận được là trường USD của chi tiết trước và sau rung khử.

- Xây dựng chương trình (FEM - Fatigue) trong môi trường Matlab để tính mức thay đổi các đặc trưng sức bền mỏi của chi tiết khi được VSR. Kết quả nhận được là giá trị của các tỷ số thể hiện mức thay đổi giới hạn mỏi và tuổi thọ mỏi của chi tiết giữa hai trường hợp có và không được VSR.

- Khảo sát ảnh hưởng của một số tham số như biên độ của gia tốc rung, thời gian rung tới các đặc trưng bền mỏi của chi tiết mẫu, làm cơ sở cho việc lựa chọn các chế độ rung khử phù hợp đạt hiệu quả tốt nhất.

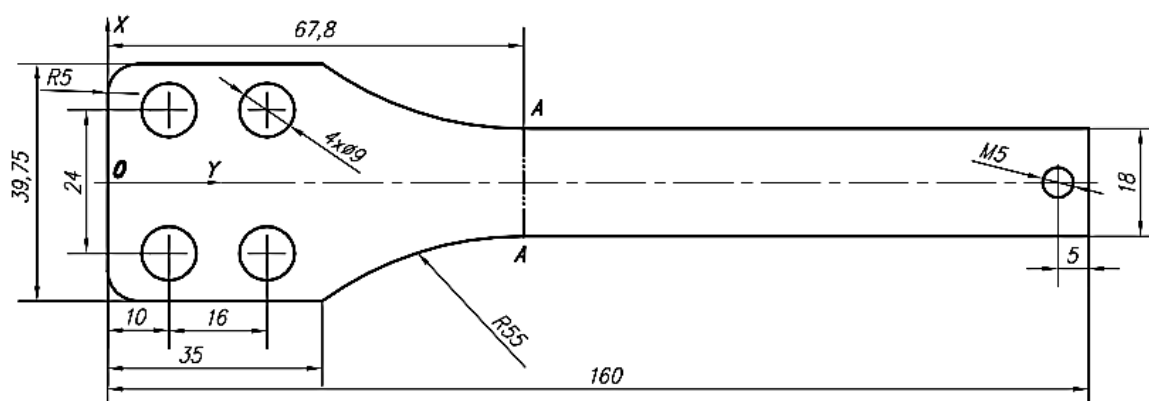
3.1. Mô phỏng ứng suất dư do quá trình gia nhiệt.

3.1.1. Mô hình mô phỏng ứng suất dư do quá trình gia nhiệt.

Chương trình mô phỏng USD giải bài toán cơ - nhiệt được xây dựng trong môi trường ANSYS Workbench, cho phép xác định trường USD do nguồn nhiệt sinh ra trên chi tiết mẫu, làm dữ liệu đầu vào cho bài toán mô phỏng VSR.

Chi tiết mẫu (mẫu) dùng để mô phỏng được mô tả cụ thể như sau:

- Hình dạng và các kích thước của chi tiết mẫu được thể hiện trên Hình 3. 1, chiều dày của mẫu là 6mm (thiết kế theo tiêu chuẩn ASTM E466-15). Phần đế của chi tiết mẫu có 4 lỗ $\varnothing 9$ phục vụ cho việc gá kẹp kiểu công xôn trên bàn rung. Trong quá trình rung khử, mẫu sẽ chịu tải uốn phẳng theo phương vuông góc với mặt phẳng của nó. Đầu tự do của mẫu có lỗ ren M5 để gá thêm khối lượng nhằm gia tăng ứng suất phát sinh trên mặt cắt khảo sát A-A đến giá trị mong muốn. Mặt cắt A-A (đường di chuyển của nguồn nhiệt) được dự kiến là nơi có ứng suất lớn nhất trong quá trình mẫu chịu rung động.



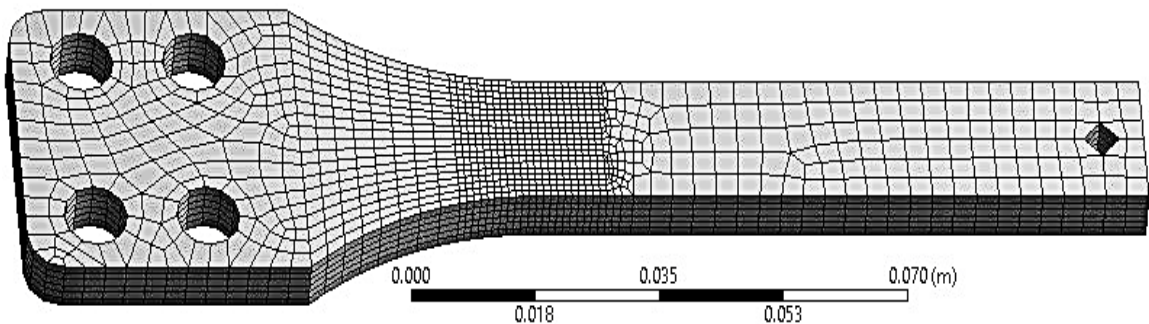
Hình 3. 1: Chi tiết mẫu trong thí dụ mô phỏng tính toán.

- Các thông số vật liệu của chi tiết mẫu được lấy phù hợp với các thông số tương ứng của thép các bon CT3. Sự phụ thuộc của các đặc trưng cơ học của vật liệu vào nhiệt độ được thể hiện trong Bảng 3. 1 (lấy theo tài liệu [44]).

Bảng 3. 1: Sự phụ thuộc của tính chất vật liệu vào nhiệt độ

Nhiệt độ ($^{\circ}\text{C}$)	Nhiệt dung riêng ($\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$)	Độ dẫn nhiệt ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)	Khối lượng riêng (kg/m^3)	Giới hạn chảy (MPa)	Độ giãn nở nhiệt ($10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)	Mô đun đàn hồi (GPa)	Hệ số Poisson
0	480	60	7880	290	1,15	210	0,3
100	500	50	7880	260	1,20	200	0,3
200	520	45	7800	240	1,30	200	0,3
400	650	38	7760	175	1,42	170	0,3
600	750	30	7600	83	1,45	80	0,3
800	1000	25	7520	22	1,45	35	0,3
1000	1200	26	7390	19	1,45	20	0,3
1200	1400	28	7300	20	1,45	15	0,3
1400	1600	37	7250	15	1,45	10	0,3
1550	1700	37	7180	11	1,45	10	0,3

- Trong phương pháp phần tử hữu hạn, luận án sử dụng mô hình phần tử dạng khối 6 mặt 8 nút. Toàn bộ chi tiết mẫu được chia thành 5754 phần tử và 7413 nút. Để quá trình mô phỏng đạt sự hội tụ và kết quả chính xác, lưới phần tử được chia dày hơn trong khu vực được gia nhiệt kiểu hàn (hai bên mặt cắt A-A). Hình 3. 2 thể hiện chia lưới của chi tiết mẫu trong bài toán mô phỏng.



Hình 3. 2: Chia lưới phần tử chi tiết mẫu.

- Nguồn nhiệt di động dùng để mô phỏng được lấy theo công thức (2.2).

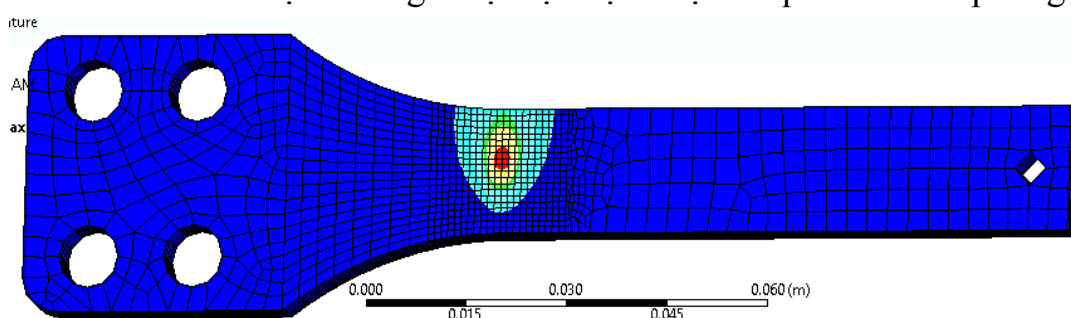
Các thông số cụ thể liên quan đến nguồn nhiệt được lấy như sau: $r = 7 \text{ mm}$; $v = 30 \text{ cm/phút}$; $\tau = 3,6 \text{ s}$; $W = 0,96 \text{ KJ}$ [39].

- Chi tiết mẫu được kẹp chặt cả hai đầu để làm tăng khả năng sinh USD. Sau khi nguồn nhiệt chạy qua, chi tiết mẫu được làm nguội nhanh xuống nhiệt độ môi trường, $T_B = 27^0\text{C}$, các điều kiện biên về tính chất nhiệt được lấy theo tài liệu [39].

Sử dụng chương trình FEM - Thermalstress-Vibration đã được xây dựng để mô phỏng quá trình cơ - nhiệt xảy ra khi cho nguồn nhiệt chạy dọc đường A-A trên Hình 3. 1. Chương trình mô phỏng được trình bày trong Phụ lục 8.

3.1.2. Kết quả mô phỏng ứng suất dư do quá trình gia nhiệt.

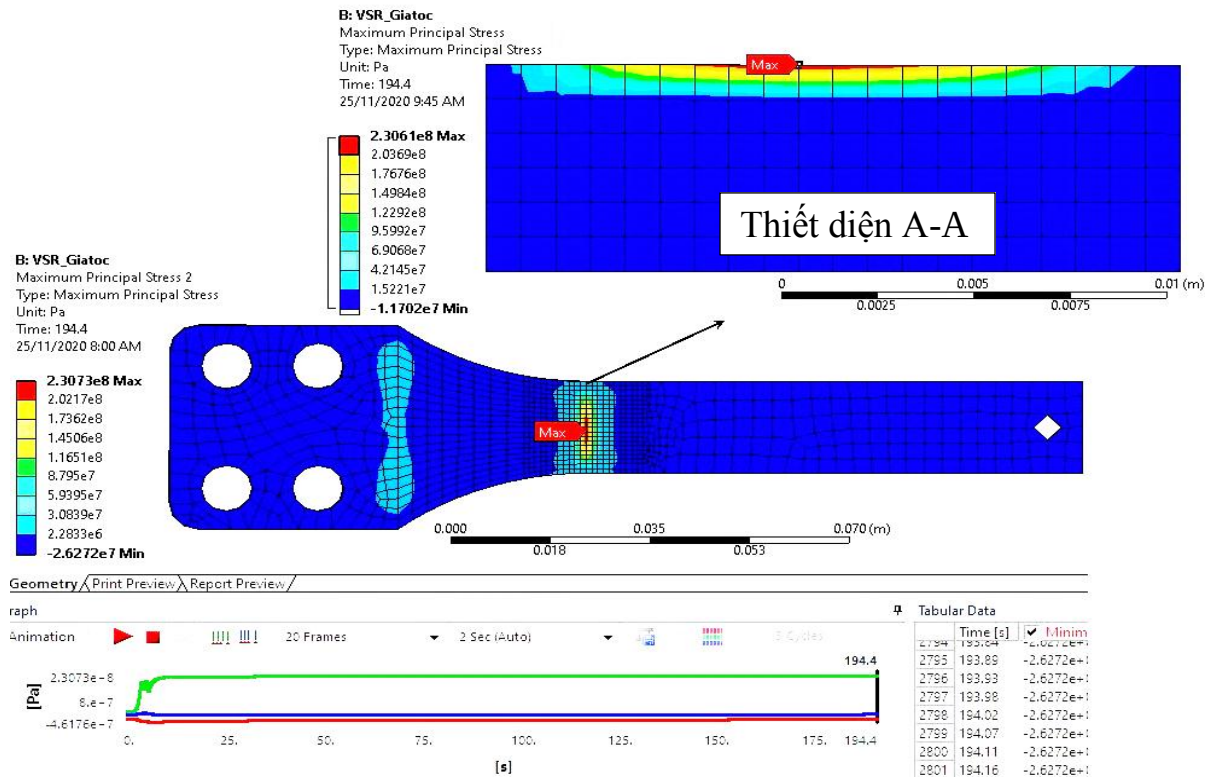
Hình 3. 3 thể hiện trường nhiệt độ nhận được từ quá trình mô phỏng.



Hình 3. 3: Nhiệt độ tạo bởi nguồn nhiệt di động trên chi tiết mẫu.

Trong quá trình mô phỏng, lịch sử thay đổi của trường nhiệt độ trên chi tiết mẫu được ghi lại (ở cả hai quá trình gia nhiệt và làm nguội) và USD trên chi tiết mẫu do nhiệt gây ra được tính toán. Kết quả mô phỏng trường USD chính (Maximum Principal Stress) trên toàn bộ chi tiết mẫu và trên mặt cắt A-A được thể hiện trên Hình 3. 4.

Từ Hình 3. 4 nhận thấy, tại các vị trí nguồn nhiệt đi qua, USD sinh ra đạt giá trị lớn nhất tại vùng chính giữa trên bề mặt và giảm dần sang hai bên theo chiều rộng và xuống phía dưới theo chiều dày của thiết diện. Các giá trị USD lớn nhất và nhỏ nhất xác định được lần lượt là 230 MPa và -11 MPa.



Hình 3. 4: Ứng suất dư trên chi tiết mẫu và mặt cắt A-A do quá trình gia nhiệt

Trường USD nhận được thông qua chương trình mô phỏng FEM-Thermalstress-Vibration phản ánh đúng qui luật phân bố USD như quá trình hàn mà nhiều tài liệu đã công bố [36, 39].

3.2. Mô phỏng quá trình rung khử ứng suất dư.

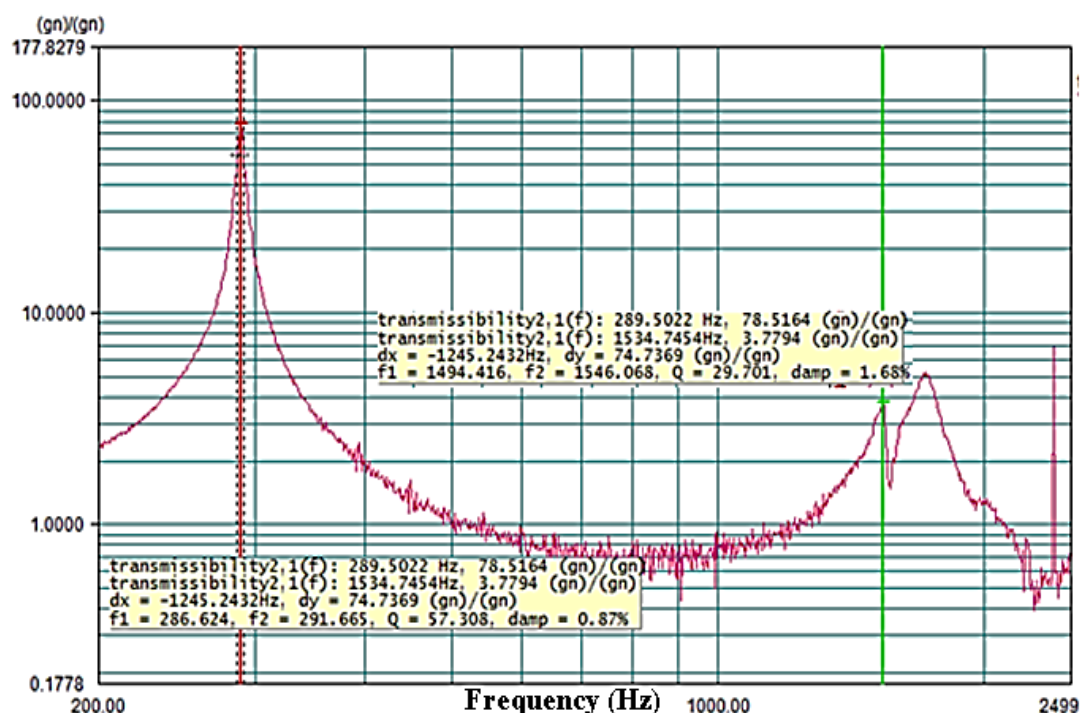
Chi tiết mẫu với trường USD thu được từ việc mô phỏng trong mục 3.1.2 được sử dụng để mô phỏng rung khử USD. Trong nội dung mô phỏng này, chi tiết mẫu được ngàm cứng ở phần đế, đầu kia để tự do.

Cho phần đế của chi tiết mẫu dao động điều hòa với gia tốc được biểu diễn theo phương trình $a(t) = A\sin(2\pi ft)$, trong đó A (m/s^2) là biên độ gia tốc dao động, f (Hz) là tần số dao động và t (s) là thời gian.

Do mô hình vật liệu là thép kết cấu nên qui luật tái bền mô tả phù hợp với tính chất của vật liệu thực là qui luật tái bền dạng hai đường thẳng (Bilinear Kinematic Hardening).

Bởi vì quá trình mô phỏng là quá trình dao động cho nên hệ số cản có ảnh hưởng đến biên độ dao động đo được và ảnh hưởng tới giá trị biến dạng của chi tiết mẫu. Do vậy, mặc dù là bài toán mô phỏng, nhưng giá trị của hệ số cản sẽ được đo trực tiếp từ chi tiết mẫu thực. Ngoài ra, mối quan hệ của biên độ gia tốc rung và ứng suất sinh ra tại các điểm khảo sát cũng cần được xác định làm dữ liệu đầu vào cho việc mô phỏng các chế độ rung khử. Quá trình khảo sát được tiến hành trong phần mềm ANSYS Workbench.

3.2.1. Khảo sát mối quan hệ giữa biên độ gia tốc dao động với ứng suất hình thành trên chi tiết mẫu.



Hình 3. 5: Hệ số giảm chấn của chi tiết mẫu gá trên đầu rung LDS.

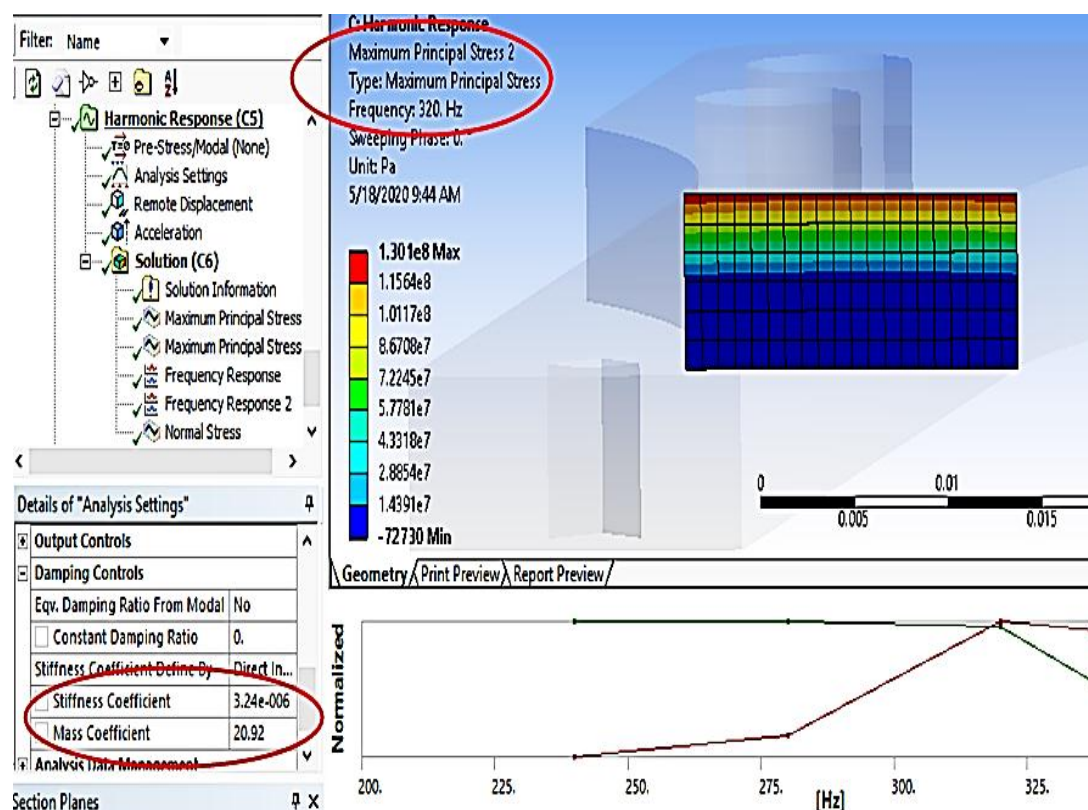
- Bước đầu tiên cần tiến hành là đo hệ số cản mode của chi tiết mẫu thực đã được chế tạo (chi tiết mẫu dùng để thí nghiệm) trên hệ thống thử nghiệm rung LDS V830-335 có các đặc trưng kỹ thuật được giới thiệu trong Phụ lục 10.4. Kết quả đo hệ số giảm chấn ở mode đầu tiên và mode thứ hai của chi tiết mẫu lần lượt là 0,87% và 1,68% (Hình 3. 5). Trong chương trình mô

phông, cần phải biết hệ số cản khối lượng α và hệ số cản độ cứng β (các hệ số giảm chấn Rayleigh) của chi tiết mẫu, hai hệ số này được tính thông qua hệ số giảm chấn Mode [61]. Cách tính các hệ số cản được trình bày cụ thể trong Phụ lục 7, còn các kết quả nhận được được trình bày trong Bảng 3. 2.

Bảng 3. 2: Các hệ giảm chấn Rayleigh.

	Mode 1	Mode 2	Hệ số cản khối lượng α	Hệ số cản độ cứng β
Tần số	289,5 Hz	1534 Hz	20,92	$3,24 \cdot 10^{-6}$
Hệ số giảm chấn	0,87%	1,68%		

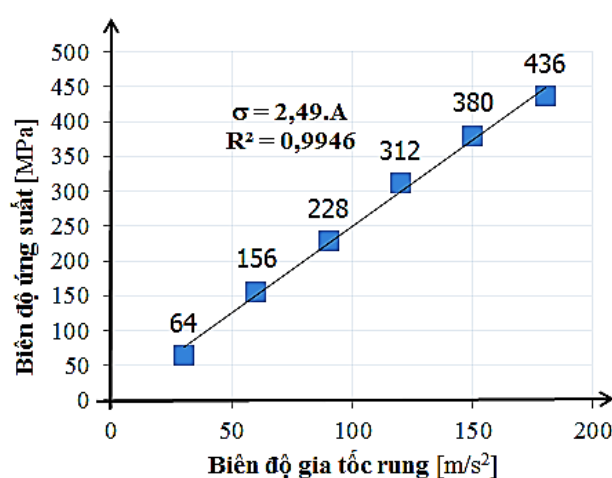
- Sử dụng phần mềm ANSYS Workbench để mô phỏng tìm tần số dao động riêng của chi tiết mẫu. Kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 3. 6. Giá trị tần số dao động riêng đầu tiên của chi tiết mẫu xác định được là 320 Hz.



Hình 3. 6: Tìm tần số dao động riêng của chi tiết mẫu bằng mô phỏng

- Tiếp theo, chúng ta sẽ khảo sát mối quan hệ giữa biên độ gia tốc rung với ứng suất chính tại mặt cắt A-A của chi tiết mẫu bằng cách mô phỏng

trong ANSYS Workbench, với hệ số cản được lấy trong Bảng 3. 2. Hình 3. 6 thể hiện một kết quả mô phỏng ứng suất động trên mặt cắt A- A khi chi tiết mẫu dao động với biên độ gia tốc là $52,2 \text{ m/s}^2$. Bằng cách cho chi tiết mẫu dao động với nhiều biên độ gia tốc khác nhau, chúng ta có thể nhận được các kết quả thể hiện sự phụ thuộc của ứng suất tại mặt cắt khảo sát vào biên độ của gia tốc rung tại tần số cộng hưởng của mẫu. Kết quả nhận được thể hiện trên Hình 3. 7.



Hình 3. 7: Sự phụ thuộc ứng suất tại mặt cắt A-A vào biên độ rung động.

Từ kết quả khảo sát cho thấy, mối quan hệ giữa biên độ gia tốc rung và ứng suất chính sinh ra tại mặt cắt A-A có thể được xem là tuyến tính, điều này phù hợp với các nghiên cứu lý thuyết đã được biết đến [6]. Kết quả khảo sát này là cơ sở của việc lựa chọn các chế độ VSR thích hợp sẽ được đề cập đến trong các phần tiếp theo.

3.2.2. Thông số đầu vào bài toán mô phỏng rung khử.

Chi tiết mẫu có USD đã được tính toán mô phỏng trong mục 3.1 sẽ được dùng để VSR. Từ mối quan hệ giữa biên độ gia tốc rung khử với ứng suất động tại mặt cắt khảo sát và USD có trong chi tiết mẫu, các chế độ VSR sẽ được phân tích lựa chọn để nghiên cứu. Mô phỏng quá trình VSR chính là giải phương trình dao động của cơ hệ có USD, phương trình này đã được

trình bày chi tiết trong tiểu mục 2.1.3. Việc giải phương trình được thực hiện trên chương trình FEM-Thermalstress-Vibration. Điều kiện biên cho tính toán mô phỏng được lấy giống như khi tiến hành thí nghiệm VSR cho các chi tiết mẫu thực tế trên hệ thống rung LDS.

3.2.3. *Tham số các đặc trưng của các chế độ rung khử ứng suất dư.*

Để khảo sát ảnh hưởng đồng thời của mức tải (thể hiện ở biên độ gia tốc) và thời gian rung tới các đặc trưng bền mỏi và sự suy giảm USD của chi tiết mẫu, biên độ gia tốc rung được lựa chọn sao cho ứng suất tổng trên mặt cắt khảo sát có thể phủ qua miền giá trị từ 230 MPa (giá trị USD) đến giá trị 440 MPa (giới hạn bền). Việc sử dụng một dãy giá trị cụ thể nhằm tìm kiếm điểm bắt đầu có hiện tượng giảm USD và điểm có khả năng giảm USD lớn nhất. Tần số rung bằng tần số dao động riêng của chi tiết mẫu. Các chế độ rung được lựa chọn và thể hiện trong Bảng 3. 3.

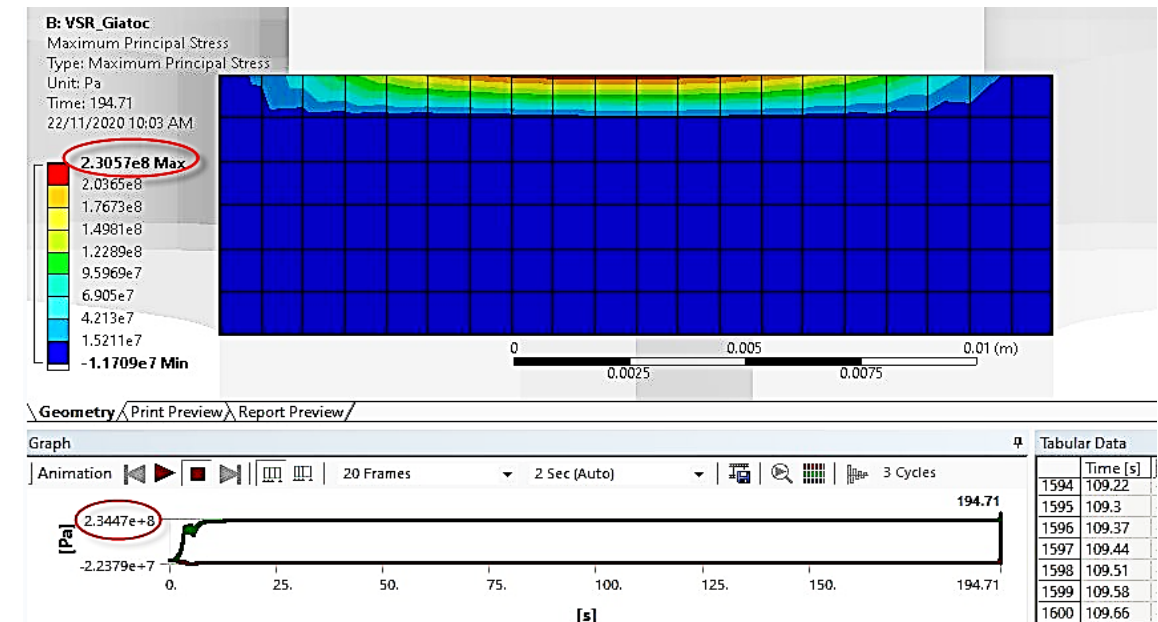
Bảng 3. 3: Các tham số liên quan đến các chế độ rung khử ứng suất dư

Chế độ rung	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ứng suất tổng vượt giới hạn chảy của vật liệu (%)	-20	-10	0	10	20	30	40	60	100
Ứng suất động do rung (MPa)	2	31	60	89	118	147	176	234	350
Biên độ gia tốc rung (m/s^2)	0,8	12	24	35	47	59	70	93	140
Tần số rung (Hz)	320								
Số chu kỳ tải rung (Chu kỳ)	Mỗi mức tải được thực hiện rung khử với ba mức chu kỳ tải là 30, 150 và 300 chu kỳ								

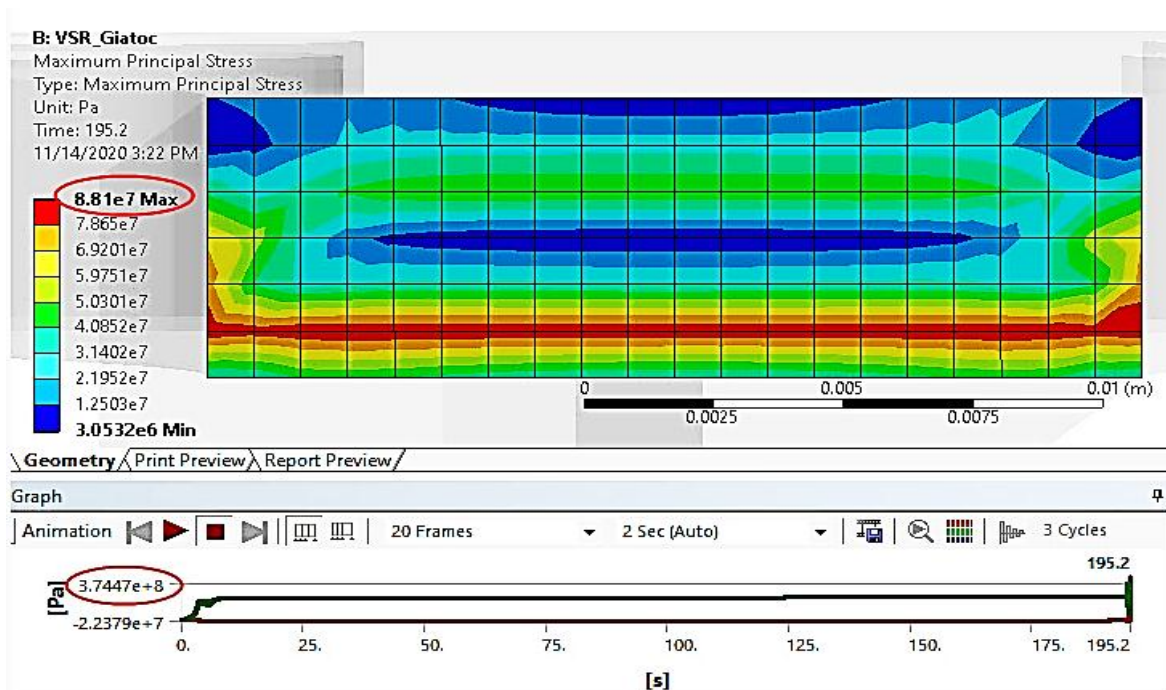
3.2.4. *Kết quả mô phỏng rung khử ứng suất dư.*

Sử dụng chương trình FEM-Thermalstress-Vibration để mô phỏng VSR và xác định trường USD trên chi tiết mẫu sau rung khử. Trường USD phân bố trên mặt cắt A-A trước và sau rung khử ở chế độ rung thứ 6 được thể hiện trên Hình 3. 8. Kết quả mô phỏng trường USD ở các chế độ còn lại được thể hiện

chi tiết trong Phụ lục 1. Sự phụ thuộc của giá trị USD lớn nhất trên chi tiết mẫu vào biên độ gia tốc và số chu kỳ rung khử được thể hiện trên Hình 3. 9.

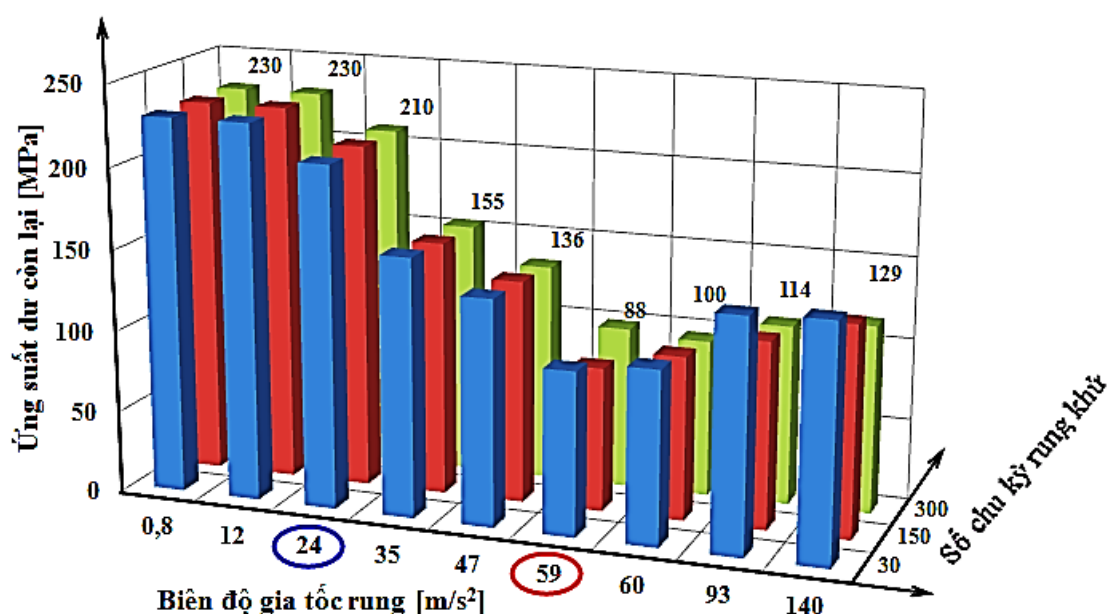


a) Trường ứng suất trên mặt cắt A-A trước rung khử ứng suất dư



b) Trường ứng suất trên mặt cắt A-A sau rung khử với biên độ tải vượt 30% giới hạn chảy

Hình 3. 8: Phân bố ứng suất dư trước và sau rung khử.



Hình 3. 9: Giá trị ứng suất dư lớn nhất còn lại sau rung khử.

Từ các kết quả nhận được nhờ mô phỏng cho phép rút ra một số nhận xét như sau:

+ Biên độ gia tốc rung khử có ảnh hưởng tới giá trị và sự phân bố của USD trên mặt cắt A-A của chi tiết mẫu. Tuy nhiên, mối quan hệ giữa biên độ gia tốc rung khử và lượng giảm USD là không tuyến tính.

+ Khi ứng suất tổng chưa vượt qua giới hạn chảy của vật liệu thì sự giảm và phân bố lại trường USD trên mặt cắt A-A của chi tiết mẫu là không xảy ra (chế độ rung 1, 2) hoặc rất nhỏ (chế độ rung 3). Kết quả mô phỏng các chế độ rung này được thể hiện trong các phụ lục từ 1a đến 1c.

+ Với biên độ gia tốc rung khử làm ứng suất tổng vượt quá giới hạn chảy của vật liệu (chế độ rung 4, 5, 6), giá trị USD giảm rất nhanh và trường USD phân bố lại đều hơn. Khi ứng suất tổng vượt quá 30% so với giới hạn chảy (chế độ rung 6) thì hiệu quả giảm USD là lớn nhất.

+ Việc tăng biên độ gia tốc quá mức không đồng nghĩa với việc tăng hiệu quả của rung khử (chế độ rung 7, 8, 9). Đồng thời bản thân quá trình rung khử cũng gây ra tổn thất mỗi.

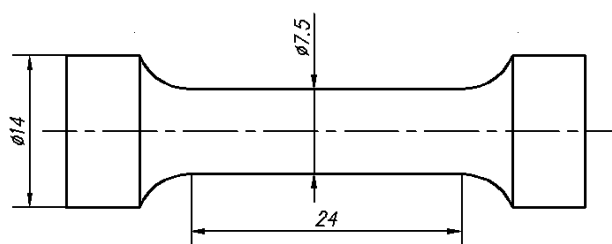
+ Số chu kỳ trong các chế độ rung khử ít ảnh hưởng tới sự thay đổi của USD cả về giá trị lớn nhất và trường phân bố. Hiệu quả giảm USD sẽ đạt được chỉ sau vài chục chu kỳ, sau đó ít có sự thay đổi khi tăng số chu kỳ rung.

3.3. Tính mức thay đổi giới hạn mỗi của chi tiết mẫu sau rung khử.

Để tính mức thay đổi giới hạn mỗi của phương pháp VSR cho chi tiết mẫu, trường USD trên chi tiết mẫu (nhận được từ kết quả mô phỏng) trước và sau khi VSR được sử dụng làm dữ liệu đầu vào của chương trình FEM-Fatigue. Chương trình FEM-Fatigue trong luận án được xây dựng bằng ngôn ngữ Matlab, nội dung của chương trình được thể hiện trong phụ lục 9. Nó cho phép xác định gián tiếp giới hạn mỗi của chi tiết hoặc kết cấu thông qua việc xác định giới hạn mỗi của mẫu thử.

3.3.1. Kiểm tra độ tin cậy của chương trình tính.

Để kiểm tra độ tin cậy của chương trình FEM-Fatigue, tác giả thực hiện tính toán giới hạn bền mỗi của hai chi tiết đã được các tác giả [52, 78] công bố, sau đó so sánh kết quả nhận được từ chương trình với các kết quả đã biết. Như trên đã trình bày, giới hạn mỗi của các chi tiết được xác định thông qua việc tính giới hạn mỗi của mẫu chuẩn. Luận án chọn mẫu chuẩn theo tiêu chuẩn GOST 380-89, hình dạng hình học và kích thước của mẫu được thể hiện trên Hình 3. 10. Các tính chất cơ học của vật liệu làm mẫu được trình bày trong Bảng 3. 4, với ν_σ phản ánh mức độ nhạy của vật liệu với sự tập trung ứng suất và kích thước tuyệt đối mặt cắt ngang đến giới hạn mỗi [78].



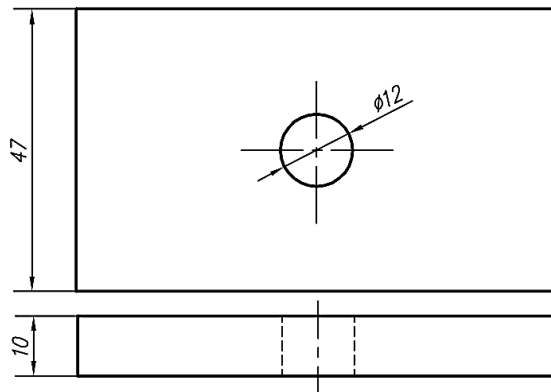
Hình 3. 10: Mẫu chuẩn tính giới hạn mỗi.

Bảng 3. 4: Các đặc trưng cơ học của vật liệu làm các mẫu thử.

Vật liệu thép	Giới hạn bền σ_B	Độ nhạy vật liệu ν_σ	Giới hạn mỏi σ_{-1}
CT3 (GOST 380-89)	402 MPa	0,15	185 MPa
45 (GOST 380-89)	580 MPa	0,1	290 MPa

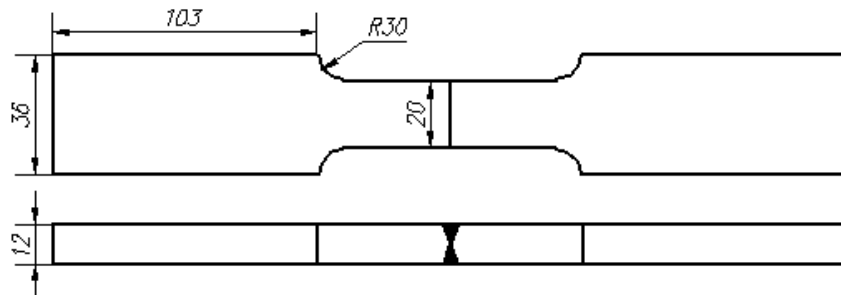
Hai chi tiết được sử dụng để đánh giá chương trình FEM-Fatigue bao gồm:

- Chi tiết thứ nhất được tài liệu [78] đề cập, có hình dạng và kích thước được thể hiện trên Hình 3. 11. Chi tiết được làm từ thép 45 (tiêu chuẩn GOST 380-89), có các đặc trưng cơ học được cho trong Bảng 3. 4.



Hình 3. 11: Chi tiết kiểm tra chương trình tính.

- Chi tiết thứ hai được tham khảo từ [52]. Đây là một chi tiết hàn, chịu kéo, có hình dạng và kích thước được thể hiện trên Hình 3. 12. Vật liệu là thép Grade 250 (tiêu chuẩn ASTM) có các thông số vật liệu tương tự thép CT3.



Hình 3. 12: Chi tiết có ứng suất dư chịu kéo.

Kết quả tính giới hạn bền mỏi bằng chương trình FEM-Fatigue được thể hiện trên Bảng 3. 5, với chu kỳ cơ sở là 2×10^6 .

Bảng 3. 5: Kết quả kiểm tra độ tin cậy của chương trình FEM-Fatigue.

TT	Giới hạn mỏi theo phương pháp số của luận án	Giới hạn mỏi công bố	Sai khác	Tham khảo
1	76,8 MPa	80 MPa	-3,9%	[78]
2	209 MPa	203 MPa	+2,9%	[52]

Bảng 3. 5 cho thấy, sai khác giữa kết quả tính theo chương trình FEM-Fatigue so với kết quả mà các tài liệu đã công bố là chấp nhận được. Theo đó, chương trình tính có đủ độ tin cậy và có thể sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của các chế độ rung khác nhau đến giới hạn bền mỏi của các chi tiết.

3.3.2. Kết quả tính mức thay đổi giới hạn mỏi.

Mức thay đổi giới hạn mỏi có thể được thể hiện qua tỷ số:

$$F = \frac{\sigma_R^{(2)} - \sigma_R^{(1)}}{\sigma_R^{(1)}} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

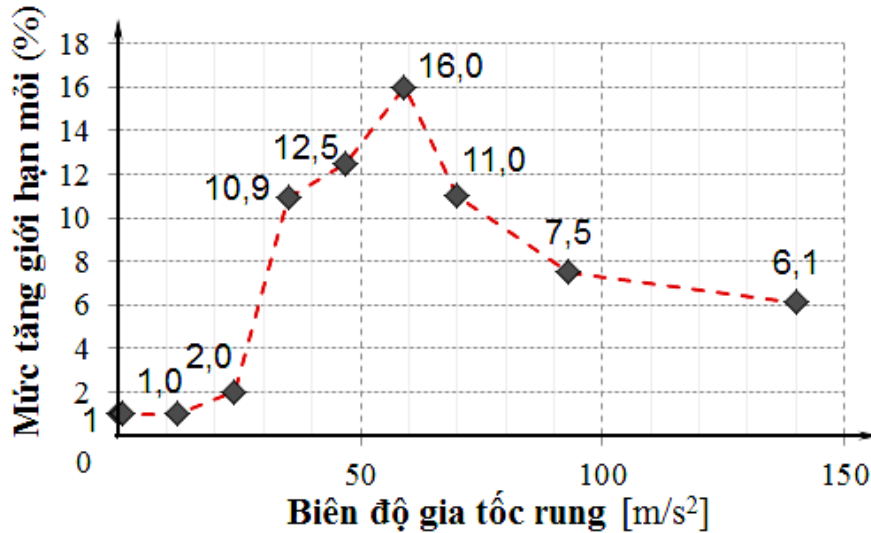
trong đó $\sigma_R^{(2)}$ là giới hạn mỏi của chi tiết có rung khử, $\sigma_R^{(1)}$ là giới hạn mỏi của mẫu không rung khử ứng suất dư.

Kết quả tính toán theo các chế độ rung khử như đã giới thiệu trong Bảng 3. 3 được thể hiện trên Hình 3. 13. Đồ thị cho thấy:

- Biên độ gia tốc rung có ảnh hưởng rõ rệt đến mức thay đổi giới hạn mỏi.
- Tồn tại một giá trị nhỏ nhất của biên độ gia tốc rung để quá trình rung bắt đầu có tác dụng. Giá trị nhỏ nhất này có thể xác định bằng phương pháp đúng dần.
- Tồn tại một giá trị hiệu quả của biên độ gia tốc rung mà với giá trị đó

mức tăng giới hạn mỗi đạt được là lớn nhất (chế độ rung 6).

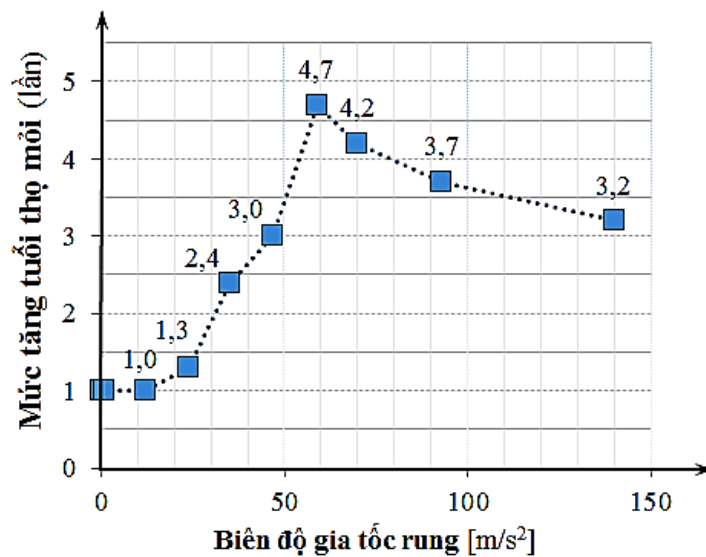
- Tăng quá mức biên độ gia tốc rung có thể làm giảm giới hạn mỗi do ứng suất động vượt quá giá trị có lợi gây nên phá hủy chi tiết.



Hình 3. 13: Mức tăng giới hạn mỗi của chi tiết mẫu với các biên độ gia tốc rung khác nhau.

3.4. Tính mức thay đổi tuổi thọ mỗi của chi tiết mẫu sau rung khử.

Luận án sử dụng phương pháp tính đã đề xuất và chương trình FEM-Fatigue để đánh giá mức độ tăng tuổi thọ mỗi của chi tiết mẫu sau VSR. Các thông số đầu vào bao gồm: ứng suất dư lớn nhất của chi tiết mẫu trước và sau khi VSR, ứng suất động do rung khử tạo ra trên mặt cắt A-A (Bảng 3. 3), các thông số đường cong mỗi ($m = 3$ và $C = 3,9 \cdot 10^{12}$) được lấy theo tiêu chuẩn IIW [35], giới hạn bền của vật liệu được khảo sát ở nhiệt độ môi trường (Bảng 3. 4). Kết quả tính toán là tỷ số giữa tuổi thọ mỗi của chi tiết mẫu sau rung và tuổi thọ mỗi của chi tiết không được VSR (công thức (2.93)) và được thể hiện trên Hình 3. 14.



Hình 3. 14: Mức thay đổi tuổi thọ mỗi chi tiết mẫu theo các chế độ rung khử.

Đồ thị Hình 3. 14 cho thấy:

- Biên độ gia tốc rung có ảnh hưởng rõ rệt tới mức thay đổi tuổi thọ mỗi của chi tiết có USD, nhưng sự ảnh hưởng đó là không đơn điệu.
- Tồn tại một giá trị nhỏ nhất của biên độ gia rung để bắt đầu có sự cải thiện tuổi thọ mỗi của chi tiết mẫu.
- Có một giá trị biên độ gia tốc rung cho mức tăng tuổi thọ mỗi của chi tiết mẫu lớn nhất.

Nhận xét kết quả mô phỏng, tính toán:

USD do quá trình gia nhiệt (nhất là phát sinh trong quá trình hàn) là rất lớn, đối với thép CT3 đạt khoảng 230 MPa, gần bằng giới hạn chảy của vật liệu (290 MPa). Kết quả này đã được kiểm chứng qua rất nhiều nghiên cứu, cả bằng mô phỏng và thực nghiệm [39, 52]. VSR tại vùng tần số cộng hưởng của chi tiết mẫu không chỉ làm giảm đáng kể giá trị USD kéo mà còn có tác dụng phân bố lại trường ứng suất đồng đều hơn. Kết quả này dẫn đến việc cải thiện các đặc trưng bền mỗi của chi tiết. Các kết quả mô phỏng và tính toán cho thấy một số vấn đề sau:

- Quá trình rung với chế độ rung phù hợp có thể làm giảm giá trị USD kéo lên tới 62%, giới hạn mỏi tăng 16% và tuổi thọ mỏi của mẫu được cải thiện đáng kể. Đối với mẫu làm từ thép CT3, chế độ rung hợp lý tương ứng với ứng suất tải vượt 30% so với giới hạn chảy của vật liệu.

- Biên độ gia tốc rung có ảnh hưởng lớn đến sự giảm USD và cải thiện các đặc trưng mỏi của chi tiết. Khi biên độ gia tốc rung chưa đạt tới giá trị hiệu quả thì cả khả năng giảm USD lẫn khả năng cải thiện các đặc trưng mỏi của chi tiết mẫu chưa cao. Khi biên độ gia tốc rung tăng làm ứng suất vượt quá giới hạn chảy của vật liệu thì hiệu quả giảm USD và cải thiện các đặc trưng mỏi của chi tiết được thể hiện rõ rệt. Sự giảm USD và tăng các đặc trưng mỏi của chi tiết không phụ thuộc một cách đơn điệu theo biên độ gia tốc rung. Khi biên độ gia tốc rung quá lớn sẽ làm cho chi tiết mẫu quá tải và cũng là nguyên nhân để USD giảm ít và các đặc trưng bền mỏi bị giảm đi.

Kết luận chương 3

Những kết quả đóng góp mới của chương 3 bao gồm:

- Xây dựng được chương trình FEM-Thermalstress-Vibration bằng ngôn ngữ APDL chạy trong môi trường ANSYS Workbench phục vụ mô phỏng trường USD do nhiệt và mô phỏng quá trình VSR. Trên cơ sở đó, luận án đã tiến hành một số khảo sát ảnh hưởng của các chế độ VSR đến hiệu quả giảm USD có hại trong chi tiết.

- Xây dựng được chương trình FEM-Fatigue trong môi trường Matlab cho phép xác định giới hạn bền mỏi và tuổi thọ mỏi của chi tiết. Đây là cơ sở để đánh giá mức thay đổi các đặc trưng bền mỏi của chi sau khi được rung khử USD. Chương trình FEM-Fatigue đã được kiểm chứng độ tin cậy với bài toán xác định giới hạn bền mỏi cho kết quả tính toán chính xác.

- Các kết quả mô phỏng và tính toán cho thấy, quá trình rung khử ứng suất dư có ảnh hưởng rõ rệt tới các đặc tính bền mỏi của chi tiết. Ngoài ra, khi

rung khử tại tần số dao động riêng của chi tiết, biên độ gia tốc rung khử có ảnh hưởng lớn đến các đặc trưng bền mỏi của chi tiết. Trong các trường hợp mà luận án khảo sát, chế độ VSR với biên độ tải vượt 30% giới hạn chảy của vật liệu cho hiệu quả cao nhất cả về khả năng giảm USD và khả năng cải thiện các đặc trưng bền mỏi của chi tiết.

Kết quả nghiên cứu của chương này công bố trong các bài báo số 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 ở danh mục công trình công bố của luận án.

Chương 4

THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH ĐẶC CÁC ĐẶC TRƯNG BỀN MỎI CỦA CHI TIẾT SAU RUNG KHỬ ỨNG SUẤT DƯ

Chương 3 đã mô phỏng quá trình VSR và tính mức thay đổi các đặc trưng bền mỏi của chi tiết mẫu theo những chế độ rung khử khác nhau. Để có cơ sở đánh giá mức độ phù hợp và độ tin cậy của các chương trình tính toán và mô phỏng số, đồng thời góp phần làm phong phú thêm kết quả nghiên cứu, chương này của luận án sẽ trình bày phương pháp, các kết quả của thí nghiệm VSR và thí nghiệm xác định các đặc trưng bền mỏi của chi tiết mẫu trước và sau VSR.

Chi tiết mẫu được tạo USD bằng phương pháp gia nhiệt cục bộ, sau đó được đo nhằm xác định các thông số như USD, tần số dao động riêng trước và sau khi rung khử. Các nội dung cụ thể của chương này gồm:

- Phân tích, lựa chọn và xây dựng phương án thí nghiệm mỗi gia tốc kiểu bậc thang cải tiến phù hợp với trang thiết bị hiện có.
- Thiết kế, xử lý và khảo sát chi tiết mẫu phục vụ thí nghiệm.
- Rung khử ứng suất dư cho các nhóm chi tiết mẫu với những chế độ rung khử có biên độ gia tốc khác nhau với cùng một khoảng thời gian rung.
- Tiến hành thí nghiệm để xác định giới hạn mỏi và tuổi thọ mỏi của các nhóm mẫu sau rung khử. Từ đó, tìm ra chế độ rung khử ứng suất dư phù hợp, đạt hiệu quả cao nhất.
- So sánh các kết quả thí nghiệm với kết quả tính toán mô phỏng nhằm đánh giá mức độ tin cậy của các chương trình tính đã xây dựng.

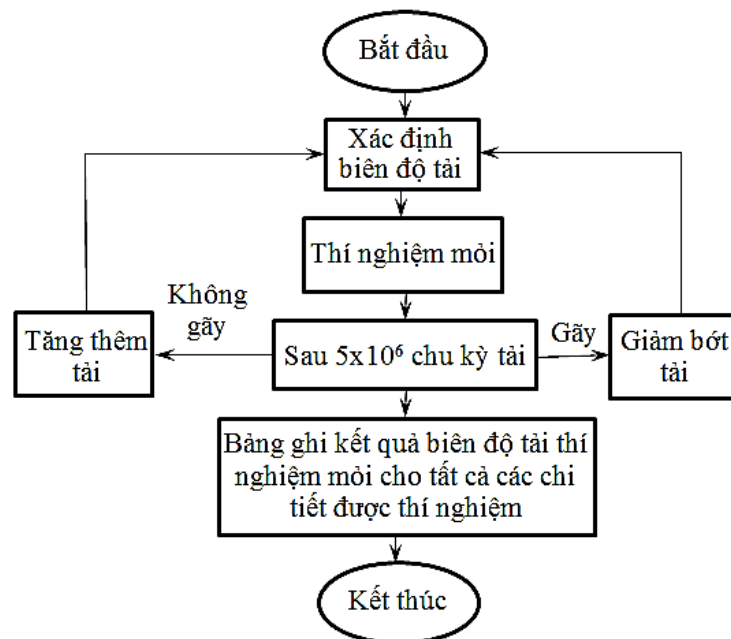
Thí nghiệm được tiến hành tại Phòng thí nghiệm đạt tiêu chuẩn ISO 17025 của các bộ môn Cơ học vật rắn và Cơ học máy, Học viện Kỹ thuật Quân sự; Phòng thí nghiệm thuộc Viện khoa học Vật liệu, Trung tâm đánh giá hư hỏng Vật liệu (COMFA) với các thiết bị đo được kiểm định chất lượng

hàng năm. Thông số mô tả các đặc trưng kỹ thuật của các thiết bị đo kiểm và các hệ thống thí nghiệm được trình bày cụ thể trong Phụ lục 10.

4.1. Phát triển phương pháp thí nghiệm mới trên hệ thống LDS.

4.1.1. Phương pháp thí nghiệm mới trên hệ thống LDS.

LDS V830-335 là hệ thống tạo tải rung, xóc với tần số có thể thay đổi trong miền rộng từ 0 tới 3000 Hz, biên độ gia tốc rung lớn nhất đạt tới 750 m/s^2 . Với khả năng này, hệ thống LDS có thể đáp ứng yêu cầu của phương pháp thí nghiệm mới gia tốc dựa trên cơ sở các tiêu chuẩn ASTM E466, JSME S 002. Một trong các phương pháp thí nghiệm mới gia tốc có thể phát triển để tiến hành trên hệ thống LDS là phương pháp bậc thang (Staircase) với sơ đồ tiến trình thí nghiệm thể hiện trên Hình 4. 1 [16].

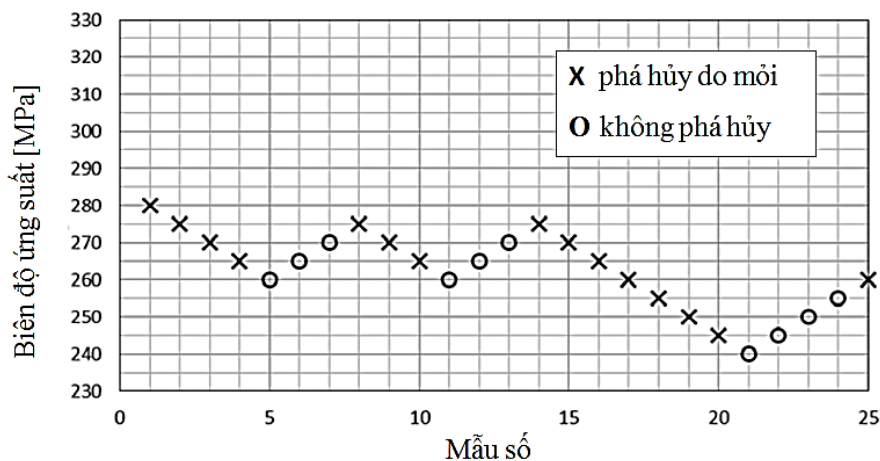


Hình 4. 1: Sơ đồ bước thí nghiệm tìm giới hạn mỏi.

Theo phương pháp này, chi tiết mẫu đầu tiên sẽ chịu mức ứng suất bằng giới hạn bền mỏi ước lượng (khoảng $(0,3 \div 0,5)\sigma_B$, σ_B là giới hạn bền của vật liệu [16]) và được thí nghiệm hết chu kỳ cơ sở (khoảng 2×10^6 đến 10^7 chu kỳ tải). Sau số chu kỳ tải đó, nếu chi tiết mẫu không bị gãy thì nó sẽ được đánh

dầu và loại bỏ (để tránh dùng lại), chi tiết mẫu tiếp theo sẽ chịu mức ứng suất tăng lên một lượng nhất định (gia số tải). Trường hợp chi tiết mẫu bị gãy trước số chu kỳ cơ sở thì chi tiết mẫu tiếp theo sẽ chịu mức ứng suất nhỏ hơn chi tiết mẫu trước đó một bậc gia số tải, gia số tải được lựa chọn phù hợp với độ lệch chuẩn để đảm bảo độ chính xác trong thí nghiệm. Với cách tiếp cận này, tổng số các chi tiết mẫu bị hỏng và các chi tiết mẫu không hỏng đúng bằng số lượng chi tiết mẫu dùng cho thí nghiệm.

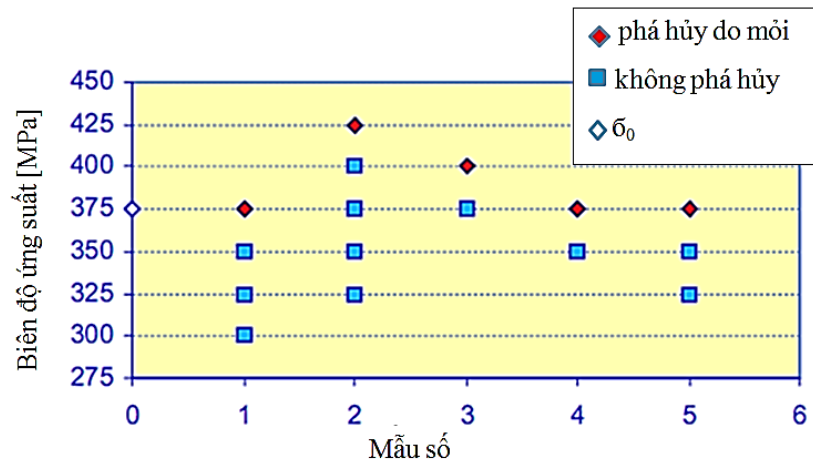
Phương pháp thí nghiệm bậc thang cần số lượng chi tiết mẫu rất nhiều, nhưng thông qua mô phỏng người ta phát hiện ra rằng số lượng chi tiết mẫu cần ít nhất là 15 mới đủ để xác định giới hạn mỏi của vật liệu [16]. Hình 4. 2 là một ví dụ về bảng ghi kết quả thí nghiệm theo phương pháp bậc thang.



Hình 4. 2: Biểu diễn kết quả thí nghiệm theo phương pháp bậc thang.

Khi số lượng chi tiết mẫu không đủ lớn có thể sử dụng phương pháp bậc thang cải tiến (Modified Staircase) [9, 16]. Theo phương pháp này, chi tiết mẫu đầu tiên được thí nghiệm tại mức ứng suất bằng giới hạn mỏi ước lượng. Nếu không bị gãy sau số chu kỳ cơ sở, chi tiết mẫu này tiếp tục được thí nghiệm mỗi với mức ứng suất tăng thêm một gia số tải so với trước đó. Gia số tải phải được chọn phù hợp với mức độ mong đợi của độ lệch chuẩn. Quá trình này được lặp lại với cùng một chi tiết mẫu cho đến khi nó bị gãy. Chi

tiết mẫu tiếp theo được thí nghiệm với mức ứng suất thấp hơn 2 bậc gia số tải so với mức ứng suất mà chi tiết mẫu trước bị gãy. Với cách tiếp cận này, số lượng chi tiết mẫu bị gãy đúng bằng với số lượng chi tiết mẫu thí nghiệm. Theo phương pháp bậc thang cải tiến số lượng mẫu thử tối thiểu phải là 3. Hình 4. 3 thể hiện một ví dụ về bảng ghi kết quả thí nghiệm tìm giới hạn bền mỏi theo phương pháp bậc thang cải tiến cho 5 chi tiết mẫu.



Hình 4. 3: Biểu diễn kết quả thí nghiệm theo phương pháp bậc thang cải tiến.

4.1.2. Xử lý kết quả thí nghiệm.

Thông qua thí nghiệm, chúng ta sẽ nhận được kết quả dưới dạng bảng như thể hiện trên Hình 4.3. Trên cơ sở bảng kết quả đó, có thể sử dụng phương pháp của Dixon & Mood [16] để tính giới hạn mỏi và độ lệch chuẩn như sau:

- Giới hạn bền mỏi:

$$\sigma_R = \sigma_0 + d \left(\frac{A}{F} - \frac{1}{2} \right) \quad (4.1)$$

- Độ lệch chuẩn:

$$\sigma_s = 1,62d \left(\frac{F \cdot B - A^2}{F^2} + 0,029 \right), \text{ nếu } \frac{F \cdot B - A^2}{F^2} \geq 0,3 \quad (4.2)$$

$$\sigma_s = 0,53d, \text{ nếu } \frac{F.B - A^2}{F^2} < 0,3$$

Trong các công thức (4.1) và (4.2), σ_0 là ứng suất thấp nhất cho sự kiện xuất hiện ít hơn; σ_s là độ lệch chuẩn; d là gia số tải (chọn trước); F, A, B được tính theo các công thức:

$$F = \sum i; \quad A = \sum f_i; \quad B = \sum i^2 f_i \quad (4.3)$$

với i là số mức ứng suất, f_i là số mẫu tại mức ứng suất i và thuộc sự kiện tương ứng.

Để tăng độ tin cậy và độ chính xác, gia số tải d được lấy trong khoảng từ $0,5\sigma_s$ tới $2\sigma_s$.

4.1.3. Chuẩn bị thí nghiệm.

Để tiến hành thí nghiệm tìm giới hạn mỏi trên hệ thống thử rung LDS, cần chuẩn bị một số nội dung cần thiết sau:

- Thứ nhất, lựa chọn phương pháp thí nghiệm mỏi là phương pháp bậc thang cải tiến.

- Thứ hai, phân tích thiết kế chi tiết mẫu phù hợp với thiết bị thí nghiệm và điều kiện thời gian. Chi tiết mẫu được thiết kế phải phù hợp với khả năng sinh tải kiểu uốn phẳng theo phương thẳng đứng (phương trục) của hệ thống LDS. Hình dáng, kích thước chi tiết mẫu phải tạo được tần số dao động riêng lớn và ứng suất sinh ra trên mẫu phải đủ lớn. Ở đây, chi tiết mẫu được thiết kế với hình dạng và kích thước như trên Hình 3. 1.

- Thứ ba, xây dựng mối quan hệ giữa biên độ gia tốc rung với ứng suất sinh ra chi tiết mẫu (tương tự đồ thị trên hình 3. 7) làm cơ sở lựa chọn mức tải xuất phát, gia số tải giữa các bậc tải. Dựa vào mối quan hệ đó để lựa chọn chế độ làm việc và điều khiển cho hệ thống LDS.

- Thứ tư, sử dụng thiết bị LMS để quan sát, đo đặc biến dạng của mẫu tại

vị trí khảo sát, từ đó tính được ứng suất động theo biên độ gia tốc rung khử. Sử dụng thiết bị RS200 để đo giá trị USD trước và sau quá trình thí nghiệm nhằm đánh giá khả năng giảm USD (thông tin về các thiết bị được trình bày trong Phụ lục 10).

4.2. Chi tiết mẫu và khảo sát đáp ứng của chi tiết mẫu.

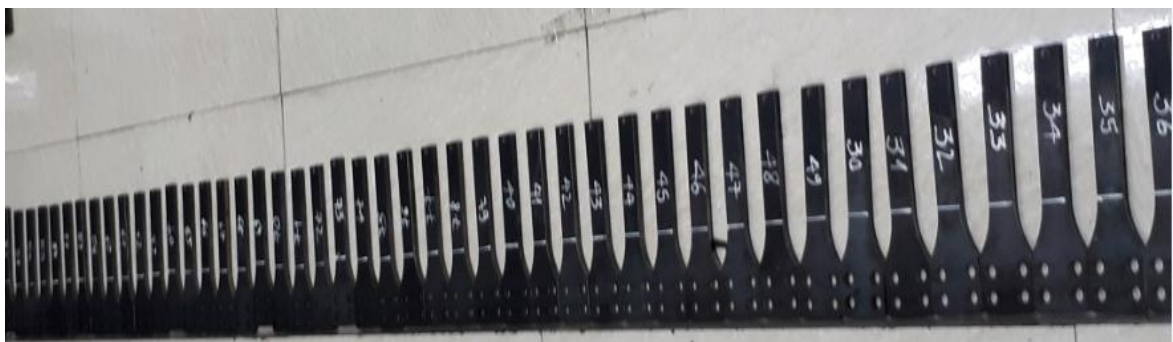
4.2.1. Thiết kế và chế tạo chi tiết mẫu.

Hình dáng, kích thước của các chi tiết mẫu được thiết kế dựa trên cơ sở tiêu chuẩn ASTM E466-15, được thể hiện trên Hình 3. 1. Chi tiết mẫu được làm từ thép các bon CT3. Thành phần thép được phân tích tại Viện khoa học Vật liệu - Trung tâm đánh giá hư hỏng Vật liệu COMFA (Phụ lục 2) và được thể hiện trên Bảng 4. 1.

Bảng 4. 1: Thành phần vật liệu thép dùng cho chi tiết mẫu thí nghiệm.

C	Cu	Fe	Mn	P	Cr	Mo	Ni	Si
0,15%	0,01%	99,2%	0,45%	0,012%	0,005%	0,003%	0,009%	0,008%

Số lượng chi tiết mẫu cần phải đủ dùng cho các quá trình khảo sát như đo USD, đo tần số dao động riêng, khảo sát mối quan hệ giữa biên độ tải và ứng suất sinh ra, và để thí nghiệm mỏi theo các chế độ rung khử khác nhau... Do vậy, số lượng chi tiết mẫu được chế tạo là 80 chi tiết. Hình 4. 4 thể hiện các chi tiết mẫu được chế tạo.



Hình 4. 4: Các chi tiết mẫu thí nghiệm được chế tạo.

Tất cả các chi tiết mẫu đều được gia nhiệt cục bộ tại vị trí thiết diện chuyển tiếp, như Hình 4. 5a. Nhiệt độ (được đo bằng thiết bị đo nhiệt cầm tay của hãng OMEGA, Hình 4. 5b) được duy trì tới 1000⁰C rồi làm nguội nhanh bằng nước để tạo ứng suất dư.



a) Chi tiết mẫu được nung nóng

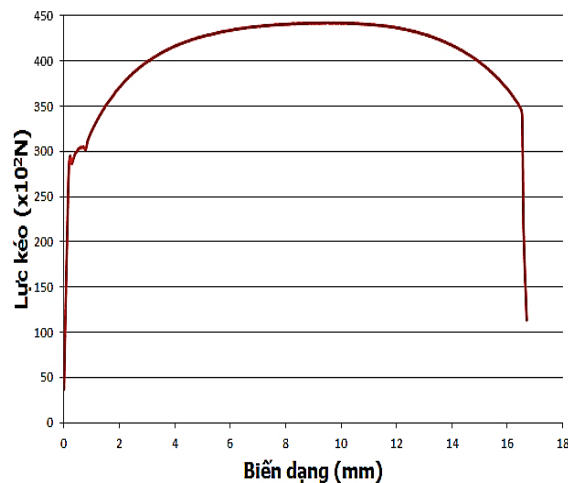


b) Đo nhiệt độ trên chi tiết mẫu

Hình 4. 5: Chi tiết mẫu được tạo ứng suất dư bằng nhiệt.

4.2.2. Xác định các đặc trưng cơ học và đáp ứng của chi tiết mẫu.

Thực hiện kéo 3 chi tiết mẫu trên máy kéo - nén vạn năng MTS-810 Landmark để xác định đặc tính cơ học của chi tiết mẫu (Hình 4. 6). Giá trị trung bình của các đặc trưng cơ học (nhận được từ thí nghiệm) được trình bày trong Bảng 4. 2 và Phụ lục 3.



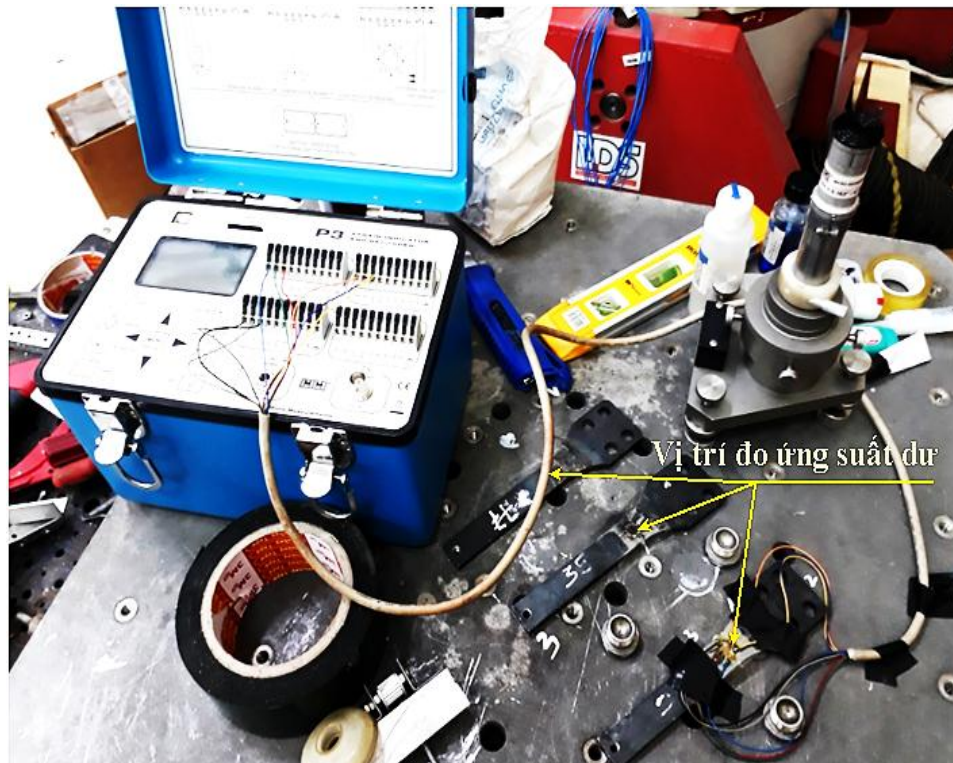
Hình 4. 6: Kéo chi tiết mẫu xác định đặc tính cơ học tĩnh.

Bảng 4. 2: Đặc tính cơ học của vật liệu làm chi tiết mẫu.

Giới hạn chảy σ_{ch}	Giới hạn bền σ_B	Mô đun đàn hồi E
296 MPa	440 MPa	200 GPa

4.2.3. Xác định ứng suất dư của chi tiết mẫu sau khi gia nhiệt.

USD của chi tiết mẫu sau khi gia nhiệt được xác định bằng thiết bị khoan lỗ RS200 và tem đo EA-06-062RE-120 trên 3 chi tiết được lấy ngẫu nhiên. Vị trí xác định USD là vùng chính giữa của đường gia nhiệt trên chi tiết mẫu như Hình 4. 7. Kết quả đo giá trị USD chính được thể hiện trong Bảng 4. 3 và Phụ lục 2, cơ sở đo USD được trình bày trong Phụ lục 11.



Hình 4. 7: Đo ứng suất dư bằng phương pháp khoan lỗ.

Bảng 4. 3: Giá trị ứng suất dư đo được trên chi tiết mẫu.

Thứ tự	Lần đo	Giá trị ứng suất dư
1	Lần đo 1 (trên chi tiết thứ nhất)	230 MPa
2	Lần đo 2 (trên chi tiết thứ hai)	203 MPa
3	Lần đo 3 (trên chi tiết thứ ba)	215 MPa
	Giá trị trung bình	216 MPa

4.2.4. Khảo sát biến dạng - gia tốc và tần số riêng của chi tiết mẫu.

4.2.4.1. Kiểm tra tem đo biến dạng.

Để kiểm tra, đầu tiên ta dán tem đo biến dạng vào vị trí chính giữa của đường gia nhiệt trên 5 chi tiết mẫu như thể hiện trên Hình 4. 8. Sau đó gá chi tiết mẫu lên đầu rung và kết nối với thiết bị LMS để nhận tín hiệu biến dạng.

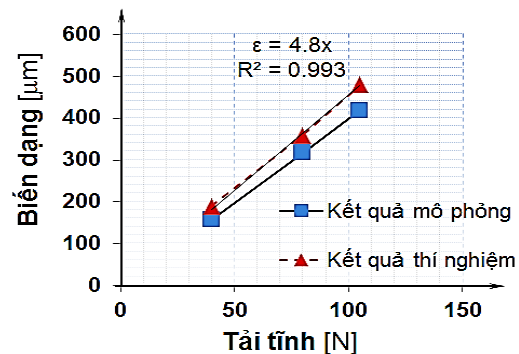


Hình 4. 8: Tem đo biến dạng được dán trên chi tiết mẫu.

Tem đo biến dạng sau khi dán lên chi tiết mẫu sẽ được kiểm tra tính ổn định trong quá trình làm việc bằng cách chát tải tĩnh tại đầu tự do (sử dụng các quả cân chuẩn để tạo tải), các mức tải được sử dụng lần lượt là 4kg, 8kg và 10,5 kg. Các chỉ số về biến dạng do tải tĩnh gây ra sẽ được đọc trực tiếp trên màn hình máy tính có kết nối với thiết bị LMS. Việc so sánh kết quả đo biến dạng bằng tem đo với kết quả mô phỏng trên phần mềm ANSYS như thể hiện trên Hình 4. 9 cho thấy tem đo biến dạng làm việc bình thường và tin cậy.



a) Chát tải tĩnh



b) Kết quả đo trên tem điện trở

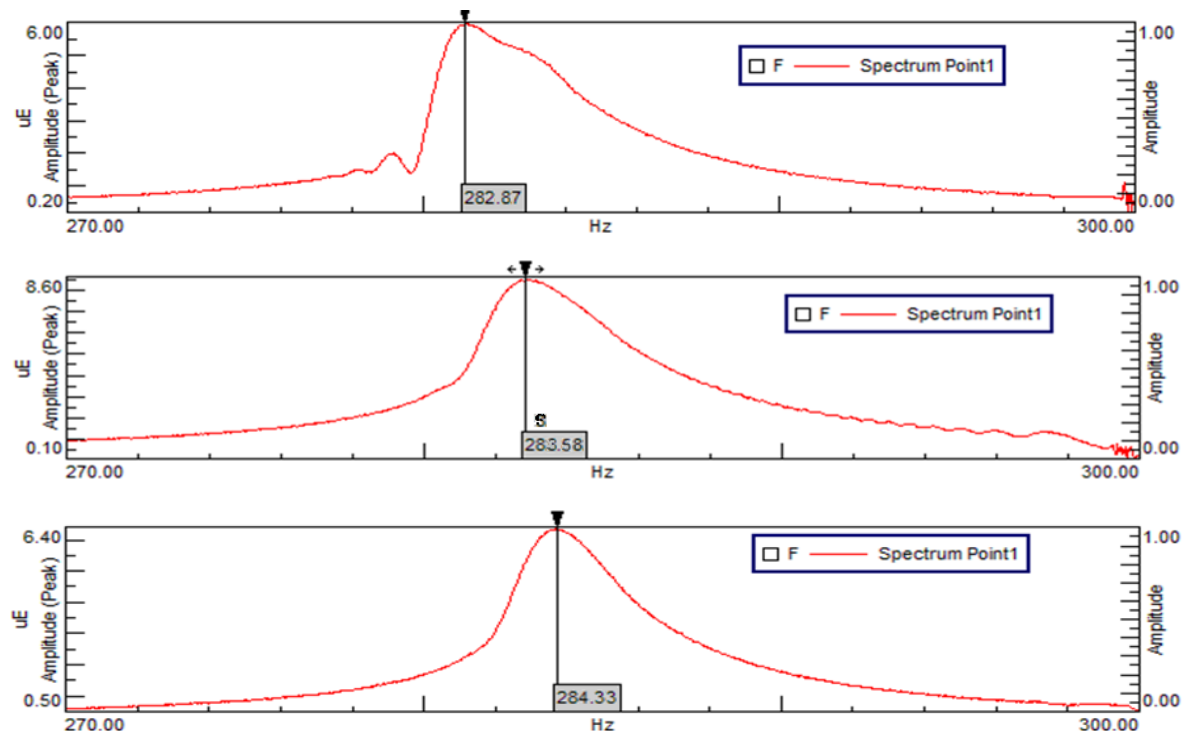
Hình 4. 9: Kiểm tra đáp ứng tải tĩnh của tem đo biến dạng.

4.2.4.2. Xác định tần số dao động riêng của chi tiết mẫu.

Chi tiết mẫu được gá đặt lên bàn rung của hệ thống LDS như Hình 4. 10. Tần số đầu rung được đặt để thay đổi liên tục từ 270 Hz tới 300 Hz. Tín hiệu thể hiện đáp ứng dao động của chi tiết mẫu được chuyển từ tem đo biến dạng đến thiết bị LMS và được hiển thị trên màn hình máy tính. Khi tín hiệu nhận được là lớn nhất thì tần số dao động tương ứng chính là tần số dao động riêng của chi tiết mẫu (hệ thống xảy ra cộng hưởng).



Hình 4. 10: Gá đặt chi tiết mẫu cần tìm tần số dao động riêng trên đầu rung.

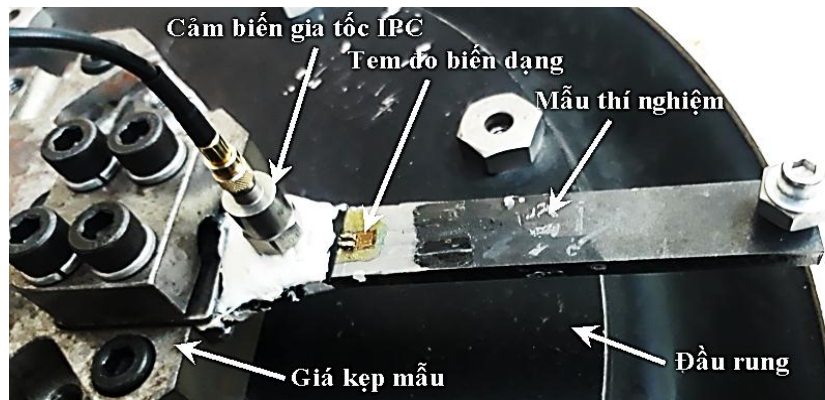


Hình 4. 11: Đáp ứng tần số của chi tiết mẫu (đo trên 3 chi tiết mẫu).

Hình 4. 11 thể hiện kết quả đo nhận được đối với 3 chi tiết mẫu được lấy ngẫu nhiên. Do các chi tiết mẫu được làm từ cùng một loại vật liệu, lại có hình dạng và kích thước như nhau, nên có thể lấy giá trị trung bình của các tần số dao động riêng của 3 chi tiết mẫu khảo sát làm tần số dao động riêng của tất cả các chi tiết mẫu. Theo đó, ta xác định được tần số dao động riêng của các chi tiết mẫu là 283,59 Hz.

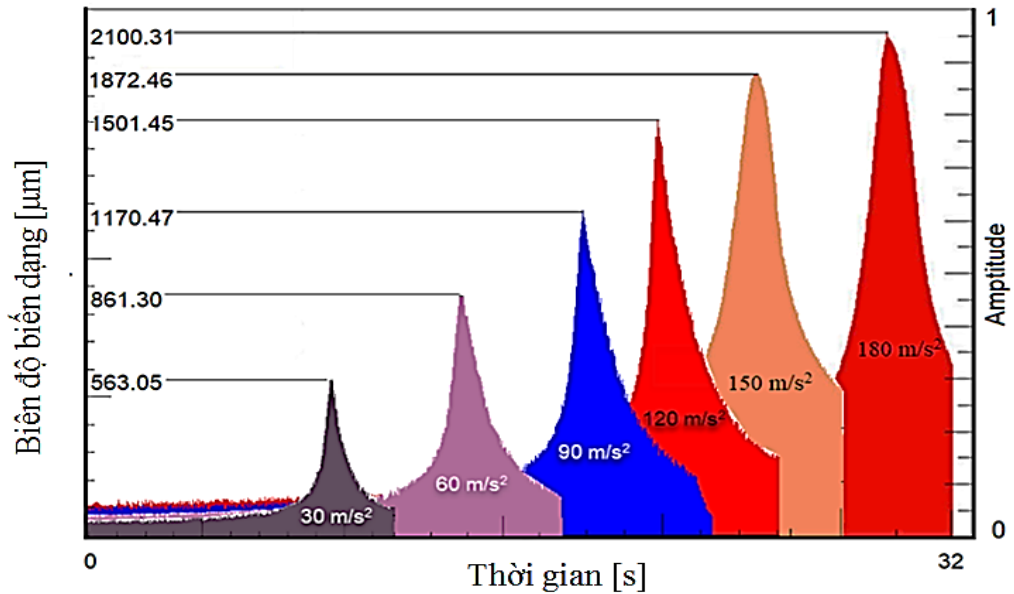
4.2.4.3. Xác định mối quan hệ giữa biên độ gia tốc rung và biên độ biến dạng của chi tiết mẫu.

Sau khi dán tem đo biến dạng, chi tiết mẫu được gá trên bàn rung của hệ thống LDS-V380 (Hình 4. 12). Tiếp đến là kiểm tra sự làm việc ổn định của tem đo biến dạng kết hợp với qui chuẩn và qui không thiết bị đo LMS. Cho đầu rung dao động với biên độ gia tốc thay đổi theo các mức khác nhau để khảo sát mối quan hệ thực tế giữa biên độ gia tốc rung và biên độ biến dạng.



Hình 4. 12: Khảo sát mối quan hệ biên độ gia tốc rung và biên độ biến dạng.

Điều khiển hệ thống LDS rung động tại tần số 283,59 Hz và biên độ gia tốc dao động của đầu rung được thay đổi từ 30 m/s^2 đến 180 m/s^2 , bước thay đổi là 30 m/s^2 . Tín hiệu biến dạng nhận được bởi thiết bị LMS được thể hiện trên Hình 4. 13. Mỗi đồ thị trên hình tương ứng với một giá trị xác định của biên độ gia tốc rung.

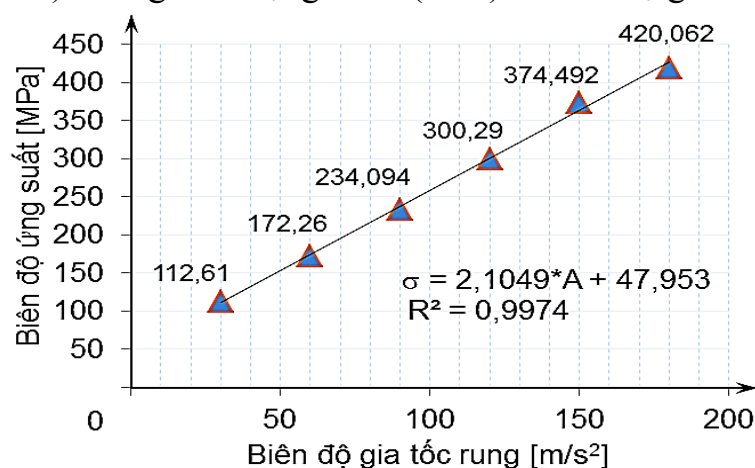


Hình 4. 13: Mối quan hệ giữa biên độ biến dạng mẫu và biên độ gia tốc rung.

Hình 4. 13 thể hiện mối quan hệ giữa biên độ biến dạng nhận được trên chi tiết mẫu và biên độ gia tốc rung. Theo đó, mối quan hệ giữa biên độ gia tốc rung và biên độ ứng suất tại mặt cắt khảo sát (Hình 4. 14) có thể được xem là tuyến tính có phương trình sau:

$$\sigma = 2,1049 * A + 47,953 \quad (4.4)$$

trong đó σ (MPa) là ứng suất động và A (m/s^2) là biên độ gia tốc rung.



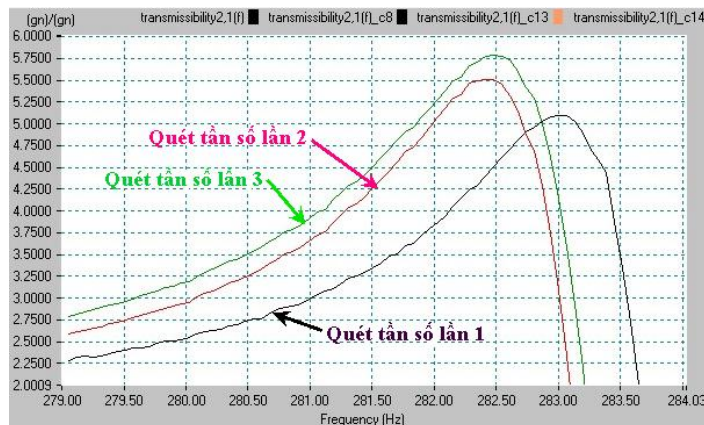
Hình 4. 14: Mối quan hệ giữa ứng suất động σ và biên độ gia tốc rung A .

4.3. Thí nghiệm rung khử ứng suất dư và thí nghiệm mỏi.

4.3.1. Rung khử ứng suất dư.

Trên cơ sở các kết quả tính toán, mô phỏng về ảnh hưởng của biên độ gia tốc và thời gian rung tới khả năng giảm USD và mức thay đổi các đặc trưng bền mỏi, thí nghiệm sẽ kiểm tra, đánh giá kết quả của những chế độ rung khử với mức gia tốc rung khử lớn (các chế độ 4 đến 9 trong Bảng 3. 3). Việc VSR được thực hiện tại tần số dao động riêng của chi tiết mẫu (được thiết lập trên bảng điều khiển của hệ thống LDS).

Với USD xác định được trên chi tiết mẫu trước rung khử là 216 MPa, để đạt được mức ứng suất tổng vượt quá giới hạn chảy của vật liệu (296 MPa) ở các mức 10%; 20%; 30%; 40%; 60%; 100% thì theo công thức (4.4) phải cho đầu rung dao động với các biên độ gia tốc lần lượt là 29,2 m/s²; 43,3 m/s²; 57,4 m/s²; 71,4 m/s²; 99,5 m/s²; 155,8 m/s². Sau mỗi lần rung khử, tần số dao động riêng của chi tiết mẫu được kiểm tra lại. Nếu sự sai khác tần số dao động riêng giữa hai lần kế tiếp nhỏ hơn một giá trị chuẩn đủ nhỏ thì quá trình rung khử ứng suất dư hoàn thành.



Hình 4. 15: Sự thay đổi tần số dao động riêng của chi tiết mẫu sau các lần rung khử ứng suất dư.

Hình 4. 15 biểu diễn sự thay đổi tần số dao động riêng của chi tiết mẫu qua các lần rung khử, trong đó việc quét tần số lần 1 được thực hiện trước

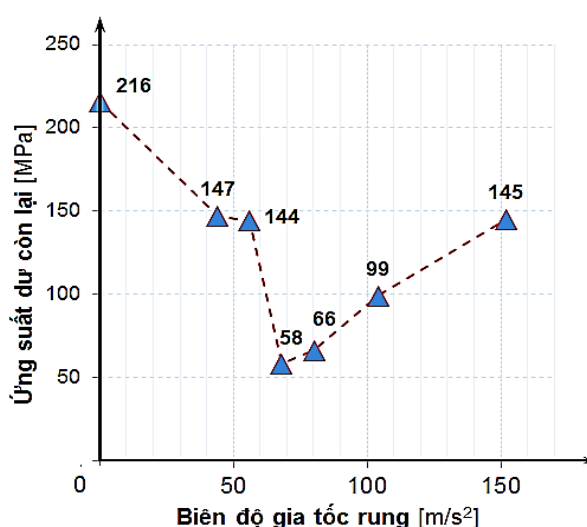
rung khử để tìm tần số riêng, quét tần số lần 2 được thực hiện sau rung khử và quét tần số lần 3 được thực hiện sau khi rung khử lần 2 (rung kiểm tra).

Quy trình VSR đã được trình bày trong mục 1.3.3, các số liệu thể hiện chế độ rung khử ứng suất dư được liệt kê trong Bảng 4. 4.

Bảng 4. 4: Các chế độ rung khử ứng suất dư được áp dụng trong thí nghiệm.

TT	Ứng suất tổng tại mặt cắt khảo sát vượt giới hạn chảy của vật liệu	Tần số rung (Hz)	Biên độ gia tốc rung (m/s^2)
1	10%	283,59	29,2
2	20%	283,59	43,3
3	30%	283,59	57,4
4	40%	283,59	71,4
5	60%	283,59	99,5
6	100%	283,59	155,8

Sau khi VSR, các nhóm chi tiết mẫu được tiến hành xác định lại giá trị USD theo phương pháp khoan lỗ theo tiêu chuẩn ASTM E837-01 đã thực hiện trong mục 4.2.3. Vị trí xác định USD được thể hiện trên Hình 4. 7, kết quả USD chính trên các chi tiết mẫu sau khi rung khử theo các chế độ rung khử khác nhau được thể hiện trên Hình 4. 16.



Hình 4. 16: Ứng suất dư còn lại sau rung với các biên độ gia tốc.

Từ kết quả nhận được trên Hình 4. 16, ta rút ra các nhận xét sau:

- Biên độ gia tốc rung khử có ảnh hưởng rõ nét tới sự suy giảm USD trên chi tiết mẫu, đặc biệt là USD dạng kéo.
- VSR có khả năng làm giảm đáng kể ứng suất dư kéo trên bề mặt chi tiết. Điều này cũng phù hợp với các kết quả mô phỏng và các kết quả nghiên cứu đã được công bố.
- Tồn tại một giá trị biên độ gia tốc rung khử cho hiệu quả giảm USD tốt nhất. Với giá trị biên độ đó, ứng suất tổng tại vị trí khảo sát vượt 30% giới hạn chảy của vật liệu và độ giảm ứng suất dư trên chi tiết mẫu đạt giá trị lớn nhất, lên tới 73%.
- Mỗi quan hệ giữa biên độ gia tốc rung với sự suy giảm USD trên chi tiết mẫu là không đơn điệu. Hình 4. 16 cũng cho thấy, việc rung với biên độ gia tốc quá lớn có thể làm cho mức giảm USD ít đi.

4.3.2. Thí nghiệm xác định đặc trưng bền mỏi.

Để xác định các đặc trưng bền mỏi, luận án chia ngẫu nhiên các chi tiết mẫu thành 7 nhóm như sau:

- Nhóm 1: gồm 7 chi tiết mẫu chưa được VSR;
- Nhóm 2: gồm 7 chi tiết mẫu được rung với biên độ gia tốc $29,2 \text{ m/s}^2$;
- Nhóm 3: gồm 7 chi tiết mẫu được rung với biên độ gia tốc $43,3 \text{ m/s}^2$;
- Nhóm 4: gồm 7 chi tiết mẫu được rung với biên độ gia tốc $57,4 \text{ m/s}^2$;
- Nhóm 5: gồm 7 chi tiết mẫu được rung với biên độ gia tốc $71,4 \text{ m/s}^2$;
- Nhóm 6: gồm 7 chi tiết mẫu được rung với biên độ gia tốc $99,5 \text{ m/s}^2$;
- Nhóm 7: gồm 7 chi tiết mẫu được rung với biên độ gia tốc $155,8 \text{ m/s}^2$.

Trong mỗi nhóm sẽ sử dụng 5 chi tiết mẫu để tìm giới hạn mỏi theo phương pháp bậc thang cải tiến, 2 chi tiết mẫu cho kiểm tra khả năng chịu mỏi ở mức tải cao hơn so với giới hạn mỏi vừa tìm được nhằm thu thập dữ liệu để xây dựng đường cong mỏi.

Các bước tiến hành thí nghiệm đã được trình bày chi tiết trong mục 4. 1. Theo đó, mức ứng suất dự kiến ban đầu cho tìm giới hạn mỏi được lấy bằng 131,9 MPa (khoảng $0,3\sigma_B$ [5, 16]) tương ứng với biên độ gia tốc rung bằng $39,8 \text{ m/s}^2$ tại tần số dao động riêng của chi tiết mẫu, gia số giữa các bậc tải là $d=10,4 \text{ MPa}$, số chu kỳ tải cơ sở là 5×10^6 . Dấu hiệu để nhận biết chi tiết mẫu bị phá hủy do mỏi là sự nứt gãy chi tiết mẫu phát hiện được nhờ quan sát.

4.3.3. Kết quả thí nghiệm và thảo luận.

4.3.3.1. Kết quả thí nghiệm giới hạn mỏi.

Kết quả thí nghiệm tìm giới hạn mỏi theo phương pháp bậc thang cải tiến cho các nhóm chi tiết mẫu được thể hiện trên các hình từ 4. 17 đến 4. 23.



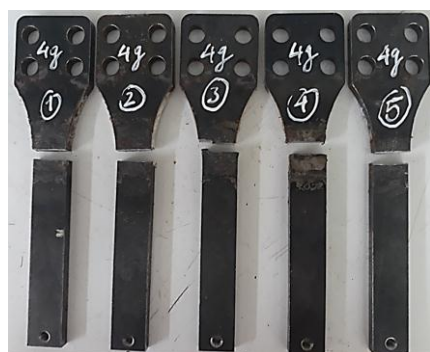
Tải (MPa)	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4	Mẫu 5
173,5					
163,1					
152,7	x		x		
142,3	0	x	0	x	
131,9	0	0	0	0	
121,5			0		x
Giới hạn mỏi của nhóm: 137 MPa					

Hình 4. 17: Nhóm chi tiết mẫu không rung khử ứng suất dư.
(x là chi tiết mẫu hỏng và 0 là chi tiết mẫu chưa hỏng)



Tải (MPa)	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4	Mẫu 5
163,1					
152,7			x	x	
142,3		x	0	0	x
131,9	x	0	0	0	0
121,5		0	0		
111,1		0			
Giới hạn mỏi của nhóm: 139 MPa					

Hình 4. 18: Nhóm chi tiết mẫu rung với biên độ gia tốc $29,2 \text{ m/s}^2$
(x là chi tiết mẫu hỏng và 0 là chi tiết mẫu chưa hỏng)



Tải (MPa)	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4	Mẫu 5
173,5					
163,1		x			
152,7	x	0	x		
142,3	0	0	0	x	x
131,9	0	0		0	0
121,5					0
Giới hạn mỏi của nhóm: 145 MPa					

Hình 4. 19: Nhóm chi tiết mẫu rung với biên độ gia tốc $43,3 \text{ m/s}^2$
(x là chi tiết mẫu hỏng và 0 là chi tiết mẫu chưa hỏng)



Tải (MPa)	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4	Mẫu 5
173,5					x
163,1			x	x	0
152,7	x	x	0	0	0
142,3	0	0	0	0	0
131,9	0	0	0		
121,5					
Giới hạn mỏi của nhóm: 156 MPa					

Hình 4. 20: Nhóm chi tiết mẫu rung với biên độ gia tốc $57,4 \text{ m/s}^2$
(x là chi tiết mẫu hỏng và 0 là chi tiết mẫu chưa hỏng)



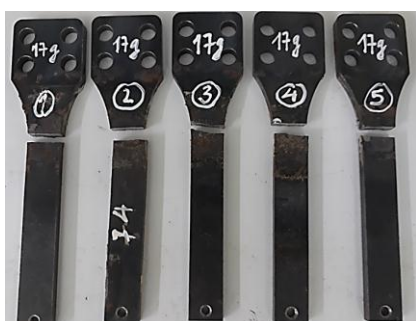
Tải (MPa)	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4	Mẫu 5
173,5					
163,1				x	
152,7	x			0	
142,3	0	x	x	0	x
131,9	0	0	0	0	
121,5			0	0	
Giới hạn mỏi của nhóm: 143 MPa					

Hình 4. 21: Nhóm chi tiết mẫu rung với biên độ gia tốc $71,4 \text{ m/s}^2$
(x là chi tiết mẫu hỏng và 0 là chi tiết mẫu chưa hỏng)



Tải (MPa)	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4	Mẫu 5
173,5					
163,1		x			
152,7		0	x		
142,3	x	0	0	x	
131,9	0	0		0	x
121,5		0		0	0
Giới hạn mỏi của nhóm: 141 MPa					

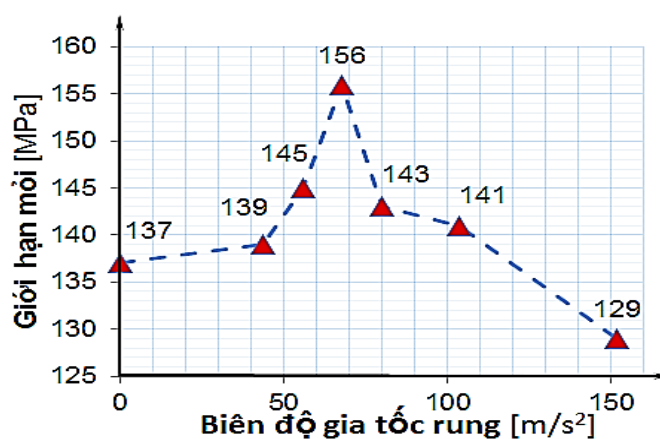
Hình 4. 22: Nhóm chi tiết mẫu rung với biên độ gia tốc $99,5 \text{ m/s}^2$ (x là chi tiết mẫu hỏng và 0 là chi tiết mẫu chưa hỏng)



Tải (MPa)	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4	Mẫu 5
163,1					
152,7					
142,3	x		x		
131,9	0	x	0	x	
121,5		0	0	0	x
111,1			0		0
Giới hạn mỏi của nhóm: 129 MPa					

Hình 4. 23: Nhóm chi tiết mẫu rung với biên độ gia tốc $155,8 \text{ m/s}^2$ (x là chi tiết mẫu hỏng và 0 là chi tiết mẫu chưa hỏng)

Xử lý kết quả tính giới hạn mỏi của chi tiết mẫu và độ lệch chuẩn theo các nội dung đã được trình bày trong phần 4. 1 và thể hiện trên Hình 4. 24.



Hình 4. 24: Giới hạn mỏi của các nhóm chi tiết mẫu theo biên độ gia tốc rung

Kết quả trên Hình 4. 24 cho biết mức độ ảnh hưởng của tải rung khử ứng suất dư tới giới hạn bền mỏi của chi tiết mẫu. Qua đồ thị ta thấy phương pháp

VSR có khả năng cải thiện khả năng chống mỏi của chi tiết có USD. Cơ chế của hiện tượng này là sự giảm giá trị của USD kéo lớn nhất và làm cho trường USD phân bố đồng đều hơn trong vật thể. Hơn nữa để đạt mức thay đổi lớn nhất về giới hạn mỏi cho chi tiết có USD thì mức tải khi rung khử phải vượt qua giới hạn chảy của vật liệu 30%. Nếu rung với biên độ tải lớn hơn không những làm cho khả năng cải thiện USD giảm mà giới hạn mỏi của chi tiết mẫu cũng bị giảm theo.

4.3.3.2. Xây dựng đường cong mỏi của chi tiết mẫu.

Theo các dạng đường cong mỏi đã được công bố, đường cong mỏi của thép các bon (cả khi có USD và khi không có USD) trong hệ tọa độ log-log thường có 2 đoạn. Một đoạn nằm ngang song song với trục hoành nối với đoạn thẳng nghiêng thứ hai tại điểm gãy (ký hiệu là điểm G). Tọa độ điểm gãy này thể hiện giới hạn mỏi và số chu kỳ cơ sở. Phương trình đoạn thẳng nghiêng có dạng như sau [5, 10, 19, 35]:

$$\log(\sigma) = -\frac{1}{m} \log(N) + \frac{1}{m} \log(C) \quad (4.5)$$

trong đó m là số mũ đường cong mỏi, C là hệ số đường cong mỏi, N là số chu kỳ tải tới phá hỏng, tương ứng với mức ứng suất σ trên đường cong mỏi.

Để xác định đoạn thẳng nghiêng của đường cong mỏi ta chỉ cần xác định thêm một điểm Q nữa mà đoạn này đi qua. Trong thí nghiệm xây dựng đường cong mỏi, luận án sử dụng 2 chi tiết mẫu trong mỗi nhóm để xác định tọa độ điểm Q. Hai chi tiết mẫu này sẽ được kiểm tra tuổi thọ mỏi với mức ứng suất cao hơn giới hạn mỏi của nhóm chi tiết mẫu tương ứng.

Việc thực hiện thí nghiệm tìm tuổi thọ mỏi trên hệ thống rung LDS về cơ bản cũng giống như thí nghiệm tìm giới hạn mỏi. Tuy nhiên, trong thí nghiệm tìm tuổi thọ mỏi, số chu kỳ tải mà chi tiết mẫu chịu rung động cho đến khi bị phá hủy do mỏi là thông số được quan tâm. Tất cả các chi tiết mẫu dùng cho

việc tìm tuổi thọ mỗi đều được rung với biên độ gia tốc bằng 70 m/s^2 (Biên độ ứng suất tải tương ứng là $195,3 \text{ MPa}$). Kết quả thí nghiệm được thể hiện trên các hình từ 4. 25 đến 4. 31.



Tuổi thọ mỗi	Mẫu 6	Mẫu 7	Trung bình
Tính theo phút	48	56	52
Tính theo chu kỳ (N)	813686	949300	884800
(logσ; logN)	(2,29; 5,94)		

Hình 4. 25: Tuổi thọ của nhóm chi tiết mẫu chưa rung khử ứng suất dư



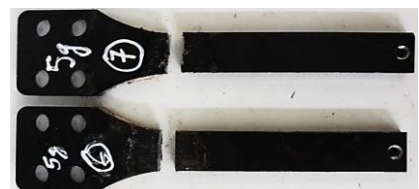
Tuổi thọ mỗi	Mẫu 6	Mẫu 7	Trung bình
Thời gian (phút)	59	69	64
Số chu kỳ (N)	1000050	1169550	1088985
(logσ; logN)	(2,29; 6,03)		

Hình 4. 26: Tuổi thọ của nhóm chi tiết mẫu rung khử với mức $29,2 \text{ m/s}^2$



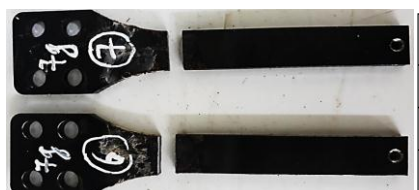
Tuổi thọ mỗi	Mẫu 6	Mẫu 7	Trung bình
Thời gian (phút)	115	80	97,5
Số chu kỳ (N)	1949802	1356384	1659001
(logσ; logN)	(2,29; 6,21)		

Hình 4. 27: Tuổi thọ của nhóm chi tiết mẫu rung khử với mức $43,3 \text{ m/s}^2$



Tuổi thọ mỗi	Mẫu 6	Mẫu 7	Trung bình
Thời gian (phút)	120	136	128
Số chu kỳ (N)	2034576	2305852	2177971
(logσ; logN)	(2,29; 6,34)		

Hình 4. 28: Tuổi thọ của nhóm chi tiết mẫu rung khử với mức $57,4 \text{ m/s}^2$



Tuổi thọ mỗi	Mẫu 6	Mẫu 7	Trung bình
Thời gian (phút)	75	98,6	86,8
Số chu kỳ (N)	1271385	1671447	1476936
(logσ; logN)	(2,29; 6,17)		

Hình 4. 29: Tuổi thọ của nhóm chi tiết mẫu rung khử với mức $71,4 \text{ m/s}^2$



Tuổi thọ mỗi	Mẫu 6	Mẫu 7	Trung bình
Thời gian (phút)	75	98,6	86,8
Số chu kỳ (N)	1271385	1671447	1476936
(logσ; logN)	(2,29; 6,17)		

Hình 4. 30: Tuổi thọ của nhóm chi tiết mẫu rung khử với mức $99,5 \text{ m/s}^2$

	Tuổi thọ mỗi	Mẫu 6	Mẫu 7	Trung bình
	Thời gian (phút)	60	83,6	71,8
	Số chu kỳ (N)	1017288	1417170	1221705
	(log σ ; logN)	(2,29; 6,08)		

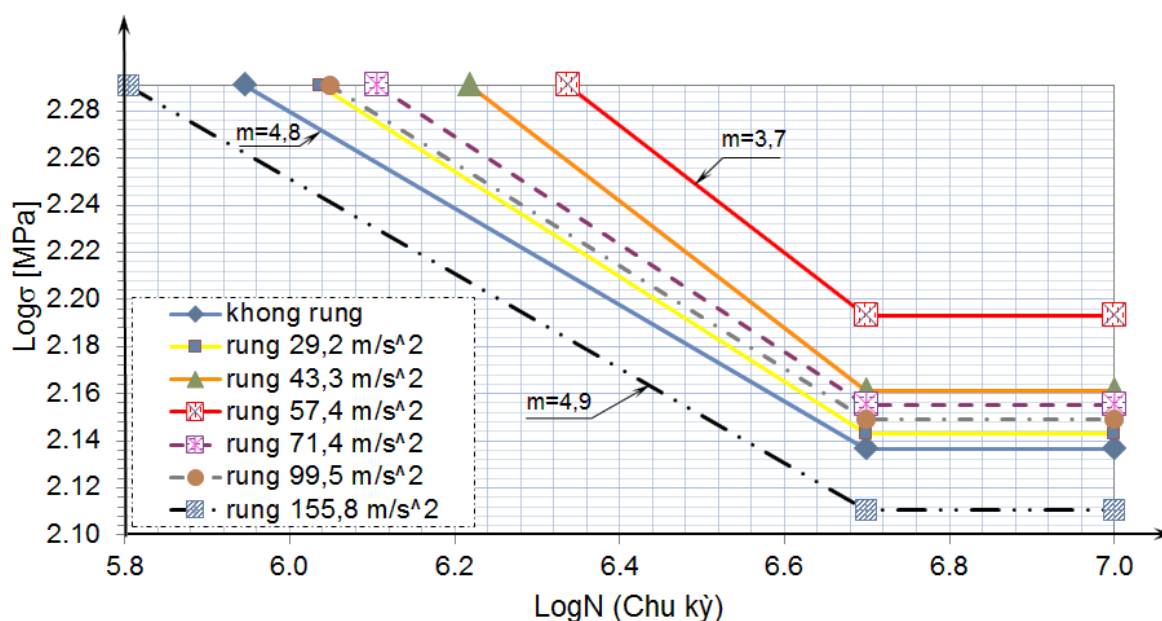
Hình 4. 31: Tuổi thọ của nhóm chi tiết mẫu rung khử với mức 155,8 m/s²

Phương trình đoạn thẳng nằm nghiêng của đường cong mỗi trong hệ trục tọa độ log-log được thành lập dựa trên kết quả thí nghiệm xác định giới hạn mỗi và tuổi thọ mỗi của các chi tiết mẫu được thể hiện trong Bảng 4. 5. Thông qua các phương trình lập được ở dạng (4.5) ta có thể tính được các hệ số m , C của đường cong mỗi tương ứng với các chế độ rung khử USD. Các hệ số này cũng được trình bày trong bảng Bảng 4. 5.

Bảng 4. 5: Phương trình đường cong mỗi của các nhóm chi tiết sau rung

Biên độ gia tốc rung	Tọa độ điểm Q (σ ; N)	Tọa độ điểm G (σ ; N)	Phương trình đoạn thẳng QG	Hệ số đường cong mỗi
0 m/s ²	(195,3; 974210)	(137; 5x10 ⁶)	log σ = -0,20logN+3,52	m= 4,8 C=10 ^{17,16}
29,2 m/s ²	(195,3; 1084800)	(139; 5x10 ⁶)	log σ = -0,22logN+3,63	m= 4,4 C=10 ^{16,34}
43,3 m/s ²	(195,3; 1471610)	(145; 5x10 ⁶)	log σ = -0,26logN+3,96	m=3,7 C=10 ^{14,73}
57,4 m/s ²	(195,3; 2170214)	(156; 5x10 ⁶)	log σ = -0,26logN+3,99	m=3,7 C=10 ^{14,85}
71,4 m/s ²	(195,3; 1453093)	(143; 5x10 ⁶)	log σ = -0,25logN+3,86	m=3,9 C=10 ^{15,15}
99,5 m/s ²	(195,3; 1118700)	(141; 5x10 ⁶)	log σ = -0,23logN+3,69	m=4,3 C=10 ^{16,00}
155,8 m/s ²	(195,3; 635805)	(129; 5x10 ⁶)	log σ = -0,20logN+3,45	m=4,9 C=10 ^{16,8}

Các đường cong mỗi được xây dựng tương ứng với các phương trình trong Bảng 4. 5 được thể hiện trong hệ tọa độ log-log như trên Hình 4. 32.



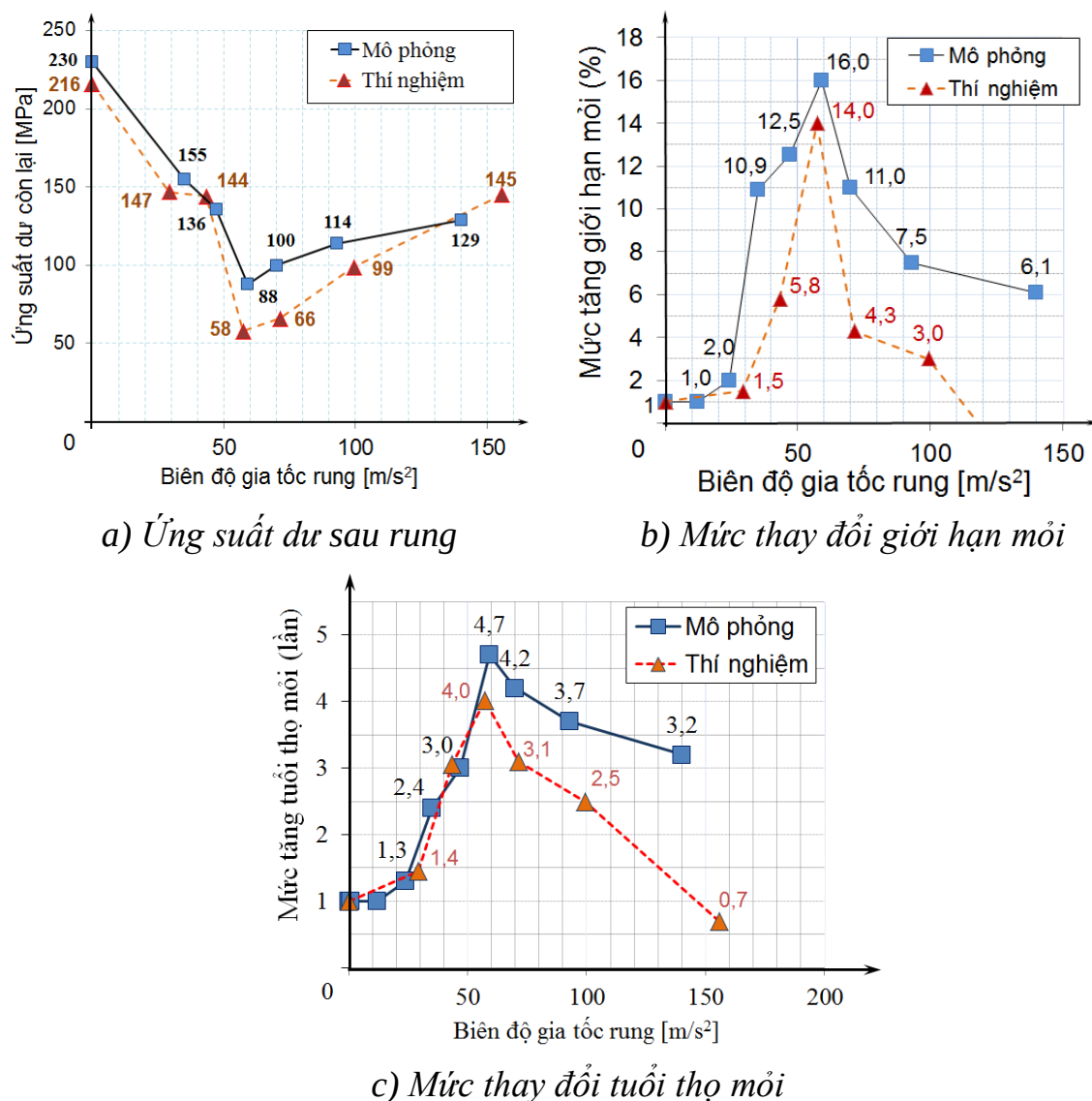
Hình 4. 32: Các đường cong mỏi của các nhóm chi tiết mẫu theo các chế độ rung khử ứng suất dư.

Hình 4. 32 cho ta thấy độ dốc của các đường cong mỏi (giá trị $1/m$) tăng dần theo mức tải rung (ở chế độ rung cho ứng suất tổng vượt 30% giới hạn chảy), sau đó lại giảm dần. Điều này cũng phản ánh kết quả của sự giảm ứng suất dư kéo cực đại và sự phân bố lại ứng suất sau rung khử. Chi tiết không được rung khử ứng suất dư, hoặc được rung khử với mức tải quá lớn đều có tuổi thọ mỏi giảm đáng kể.

Chi tiết ứng với đường cong mỏi có độ dốc càng thấp thì tuổi thọ mỏi của chi tiết thay đổi càng nhiều khi thay đổi ứng suất động tác dụng lên chi tiết, có nghĩa là với sự tăng giảm ứng suất tải một lượng nhỏ thì tuổi thọ mỏi của chi tiết đã bị thay đổi đáng kể, điều đó cũng có thể hiểu rằng với cùng một mức tải thì chi tiết nào có đường cong mỏi với độ dốc lớn hơn thì có tuổi thọ mỏi lớn hơn. Như vậy, nhóm chi tiết được rung khử với chế độ mà ứng suất vượt giới hạn chảy 30% (tương ứng biên độ gia tốc rung là $57,4 \text{ m/s}^2$) có tuổi thọ mỏi lớn nhất khi chúng cùng làm việc với điều kiện tải như nhau, kết quả này cũng tương ứng với kết quả mô phỏng tính toán trong chương 3.

4.3.3.3. So sánh kết quả mô phỏng với kết quả thực nghiệm.

Hình 4. 33 thể hiện kết quả mô phỏng và kết quả thực nghiệm về sự giảm USD và mức thay đổi các đặc trưng môi trên cùng một hệ trục tọa độ. Mức thay đổi giới hạn môi của các nhóm mẫu ở các chế độ rung khử được tính theo phần trăm so với giới hạn môi của chi tiết mẫu khi không rung khử. Cách tính mức thay đổi tuổi thọ môi cho các nhóm chi tiết tương ứng với các đường cong môi thực nghiệm trên Hình 4. 32 so với tuổi thọ môi của nhóm chi tiết không rung khử được thể hiện trong Phụ lục 12.



Hình 4. 33: So sánh kết quả mô phỏng và thí nghiệm.

Kết quả trên Hình 4. 33 cho thấy:

- Kết quả giữa mô phỏng và thực nghiệm có sự sai khác về độ lớn, nhưng tính quy luật của chúng là khá tương đồng.
- Phương pháp rung khử có khả năng làm giảm USD và cải thiện các đặc trưng mỏi của chi tiết.
- Tồn tại một giá trị của biên độ gia tốc rung để quá trình rung khử đạt hiệu quả cao nhất, nghĩa là, việc rung khử với các biên độ gia tốc lớn hơn hay nhỏ hơn đều cho hiệu quả kém hơn, đặc biệt khi rung với biên độ gia tốc quá lớn khi đó chi tiết quá tải, đây chính là điều kiện thuận lợi để vết nứt mỏi phát triển nhanh và làm giảm các đặc trưng bền mỏi của chi tiết.
- Kết quả mô phỏng USD do quá trình nhiệt (230 MPa) sai khác với USD trên mẫu thật (216 MPa) là 6%. Trong quá trình rung khử USD, sai số lớn nhất về khả năng giảm USD giữa các kết quả mô phỏng và thực nghiệm là 11% (mô phỏng là 62% và thực nghiệm là 73%).
- Trong tính toán giới hạn mỏi của chi tiết mẫu, sai khác lớn nhất về mức tăng giới hạn mỏi giữa tính toán và thực nghiệm là 11% (mô phỏng là 6,1% và thực nghiệm là - 5,8%).
- Kết quả về tính mức tăng tuổi thọ mỏi theo mô phỏng và thực nghiệm có sự sai lệch nhỏ khi biên độ gia tốc rung chưa lớn (nhỏ hơn 60m/s^2), khi đó, sai số lớn nhất là 15% (thí nghiệm là 4,0 lần và mô phỏng là 4,7 lần). Tuy nhiên khi biên độ gia tốc rung tăng lên thì sai số này càng tăng, điều này là do trong mô phỏng chỉ dùng một hệ số đường cong mỏi ($m=3$, $C=3,9.10^{12}$) nhưng các đường cong mỏi thu được bằng thực nghiệm có các hệ số thay đổi lớn theo các chế độ rung khử.

Nguyên nhân cho các sai số kể trên là vì trong thực nghiệm có rất nhiều yếu tố ảnh hưởng tới kết quả mà trong mô phỏng không được kể đến như: các mẫu không thể giống nhau tuyệt đối về vật liệu và hình dạng, vị trí gá đặt mẫu

và các cảm biến có sự sai khác qua mỗi lần gá đặt, và sai số trong quá trình đo.... Tuy nhiên, những sai số giữa mô phỏng và thực nghiệm được dẫn ra ở trên là chấp nhận được.

Thảo luận

Các kết quả thí nghiệm thể hiện trên các Hình 4. 16, Hình 4. 24 và Hình 4. 32 cho thấy ảnh hưởng của phương pháp rung khử ứng suất dư tới đặc tính cơ học của chi tiết có ứng suất dư là rất rõ ràng.

Phương pháp rung khử ứng suất dư có khả năng làm giảm ứng suất dư kéo có hại và làm phân bố lại trường ứng suất dư đồng đều hơn trên toàn bộ chi tiết. Với chế độ rung khử ứng suất dư phù hợp thì khả năng giảm ứng suất dư kéo của phương pháp này là khá tốt, giá trị ứng suất dư kéo cực đại giảm tới 73%.

Phương pháp rung khử ứng suất dư có khả năng cải thiện các đặc tính mỏi của chi tiết. Đối với vật liệu và chi tiết được khảo sát trong luận án, khi ứng suất tổng tại điểm khảo sát vượt 30% giới hạn chảy của vật liệu thì giới hạn mỏi của chi tiết tăng tới 14% và độ dốc đường cong mỏi ($1/m$) càng được tăng lên, do vậy tuổi thọ mỏi của chi tiết càng được cải thiện.

Kết luận Chương 4

Những kết quả chính của chương 4 bao gồm:

1. Xây dựng được phương pháp thí nghiệm mỏi gia tốc có thể thực hiện trên thiết bị hiện có trong nước. Thiết kế, chế tạo chi tiết mẫu thí nghiệm theo tiêu chuẩn phù hợp với phương pháp và thiết bị thí nghiệm đã được lựa chọn. Khảo sát tính chất cơ học, đáp ứng tần số, biến dạng, tạo và đo ứng suất dư trên chi tiết mẫu làm cơ sở lựa chọn tham số rung khử USD.
2. Thực hiện VSR theo các chế độ rung khác nhau, thí nghiệm tìm các đặc trưng bền mỏi cho 7 nhóm mẫu sau rung khử. Phân tích đánh giá kết quả thí nghiệm để xác định chế độ rung khử hợp lý và có hiệu quả cao.

3. So sánh và đánh giá sự sai khác giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm trong cả quá trình tạo USD, rung khử USD, với sai số đã được phân tích có thể khẳng định chương trình mô phỏng và tính toán đủ độ tin cậy.

Nội dung chương 4 được công bố trong các bài báo 3, 4, 12 trong danh mục các công trình công bố của luận án.

KẾT LUẬN CHUNG

Đánh giá chung về kết quả của luận án

Luận án nghiên cứu làm rõ ảnh hưởng của các tham số trong chế độ VSR tới khả năng giảm USD và khả năng cải thiện các đặc trưng bền mỏi của chi tiết. Bằng phân tích lý thuyết, sử dụng phương pháp số và thực nghiệm, luận án đã có một số đóng góp chính như sau:

1. Thiết lập được các phương trình thể hiện mối quan hệ giữa các tham số rung với ứng suất dư trong chi tiết và với sự thay đổi các đặc trưng bền mỏi của chi tiết sau rung khử ứng suất dư.

2. Xây dựng được các thuật toán và chương trình cho phép tính toán, khảo sát số xác định mức độ thay đổi ứng suất dư, giới hạn mỏi và tuổi thọ mỏi của chi tiết sau rung khử ứng suất dư với các thông số rung động khác nhau.

3. Đã tiến hành thí nghiệm để xác định chế độ rung hợp lý và khảo sát giới hạn bền mỏi, tuổi thọ mỏi sau quá trình rung khử ứng suất dư. Kết quả thí nghiệm có giá trị kiểm chứng, đánh giá mức độ tin cậy của phương pháp lý thuyết và chương trình đã được thành lập.

Những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu

Tiếp tục nghiên cứu khả năng cải thiện tính chất cơ học nói chung, và tính bền mỏi nói riêng của phương pháp rung khử đối với các vật liệu khác nhau, đặc biệt cho mối hàn và các vật liệu FGM.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN

1. Bùi Mạnh Cường, Đỗ Văn Sĩ, Nguyễn Văn Dương (2017), “*Khảo sát ảnh hưởng của một số qui luật tái bền vật liệu đến hiệu quả khử ứng suất dư trong kết cấu bằng phương pháp rung động*”, Tuyển tập công trình khoa học hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ X, Học viện Kỹ thuật Quân sự, tháng 12-2017, trang 666-673.
2. Nguyễn Văn Dương, Bùi Mạnh Cường, Đỗ Văn Sĩ (2017), “*Nghiên cứu mô hình cơ học quá trình hình thành ứng suất dư và rung khử ứng suất dư*”, Tuyển tập công trình khoa học hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ X, Học viện Kỹ thuật Quân sự, tháng 12-2017, trang 680-686.
3. Đỗ Văn Sĩ (2018), “*Ảnh hưởng của rung khử ứng suất dư tới tuổi thọ của mối hàn chịu tải ngẫu nhiên*”, Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 10 năm 2018, trang 64-70.
4. Đỗ Văn Sĩ, Bùi Mạnh Cường (2019), “*Nghiên cứu xây dựng phương pháp thí nghiệm mới của mối hàn trên bàn rung LDS*”, Tuyển tập công trình khoa học hội nghị Cơ học kỹ thuật toàn quốc, 9/4/2019, trang 183-190.
5. Repetckii O., Do Van Si, Nguyen Van Duong, Bui Manh Cuong (2019), “*Determining the fatigue characteristics of weld component by numerical method*”, Baikal Letter DaaD, N^o1 2019, pp. 4-12.
6. Repetckii O., Bui Manh Cuong, Nguyen Van Duong, Do Van Si (2019), “*Crack detection of butt-welded specimens using experimental and finite element analysis*”, Baikal Letter DaaD, N^o1 2019, pp. 32-41.
7. Đỗ Văn Sĩ; Bùi Mạnh Cường; Nguyễn Văn Dương (2020), “*Khảo sát ảnh hưởng của các thành phần ứng suất dư đến đặc tính dao động của kết*

cấu”, Tuyển tập công trình hội nghị khoa học các nhà nghiên cứu trẻ lần thứ XV-năm 2020, trang 172-181.

8. Đỗ Văn Sĩ, Bùi Mạnh Cường (2020), “*Đánh giá tuổi thọ của mối hàn giáp mối dưới tác dụng của tải trọng thay đổi ngẫu nhiên*”, Tạp chí Khoa học & Kỹ thuật, số 206, tháng 5-2020, trang 5-14.
9. Repetckii O., Bui Manh Cuong, Do Van Si (2020), “*The effect of blowhole defects in the welded structures on its dynamics*” Baikal Letter DaaD, N^o1 2020, pp. 33-42.
10. Đỗ Văn Sĩ, Bùi Mạnh Cường, Nguyễn Thị Hồng (2021), “*Mô phỏng rung khử ứng suất dư và đánh giá khả năng tăng giới hạn mỏi của phương pháp*”, Tạp chí khoa học kỹ thuật Thủy Lợi & Môi Trường, Trường ĐH Thủy Lợi, số 74, trang 55-61, tháng 6-2021, ISSN 1859-3941.
11. Đỗ Văn Sĩ; Bùi Mạnh Cường; Nguyễn Văn Dương (2021), “*Tính toán mức tăng tuổi thọ của kết cấu sau rung khử ứng suất dư theo các giả thuyết khác nhau*”, Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Trường đại học Công nghiệp Hà Nội, tập 57, số 6, tháng 12-2021.
12. Duong Nguyen Van, Cuong Bui Manh, Si Do Van (2021), “*Study on the role of dynamic stress on the stress relaxation process in vibratory stress relieving technology*”, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering vol. 7, no. 1, pp. 56-65,
DOI: <https://doi.org/10.46604/aiti.2021.8714>.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

1. Phạm Đình Ba (2005), *Động lực học công trình*, NXB Xây Dựng, Hà Nội.
2. Đào Huy Bích (2004), *Lý thuyết dẻo và ứng dụng*, NXB Xây Dựng, Hà Nội.
3. Nguyễn Văn Dương (2015), “Nghiên cứu thiết kế và chế tạo thiết bị rung khử ứng suất dư ứng dụng cho chi tiết cơ khí dạng hàn và đúc có trọng lượng và kích thước lớn”, Đề tài cấp nhà nước KC03.27/11-15.
4. Nguyễn Văn Dương (2017), “Ảnh hưởng của tần số lực cưỡng bức đến hiệu quả khử ứng suất trong công nghệ rung khử ứng suất dư”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, 12(1) 1.2017. pp 37-41.
5. Ngô Văn Quyết (2000), *Lý thuyết môi*, NXB giáo dục.
6. Đỗ Quyết Thắng (2008), *Chi tiết máy*, Học viện Kỹ thuật Quân sự.
7. Trương Tích Thiện (2017), *Lý thuyết dẻo kỹ thuật*, NXB Đại học Quốc Gia TP. Hồ Chí Minh.
8. Trần Minh Tú (2019), *Phân tích kết cấu tấm bằng vật liệu cơ tính biến thiên- Functionnally graded material*, NXB Xây Dựng.

Tiếng Anh

9. A. A. Azeez (2013), *Fatigue Failure and Testing Methods*, Mechanical Engineering and Production Technology, HAMK.
10. ABS (2003), *Guide for the Fatigue Assessment of Offshore Structures*.
11. A. R. Soto-Raga (1983), *An Analysis of the Mechanism of Reduction of Residual Stresses by Vibration*, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, April 1983.

12. ASTM E837-13a (2013), *A standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method*, pp. 1–16.
13. A. Wohler (1867), “Versuche uber die Festigkeit der Eisenbahnwagennachsen”, *Zeitschrift fur Bauwesen*, 10; English summary, *Engineering*, 4, pp. 160-161.
14. AWS Welding handbook, vol 1, P 218-2130.
15. C. A. Walker, A.J. Waddell & D.J. Johnstone (1995), “Vibratory stress relief An investigation of the underlying process”, *Proceedings Institute of Mechanical Engineers*, 209, pp. 51-58.
16. CIMAC WG4 (2009), *Guidance for evaluation of Fatigue Tests*, IACS UR M53, Appendix IV.
17. D. Djuric, R. Vallant, K. Kerschbaumer, N. Enzinger (2011), “Vibration stress relief treatment of welded high-strength martensitic steel”, *Weld World*, 55, pp. 86–93.
18. D. J. Smith, G. H. Farrahi, W. X. Zhu, C.A. McMahon (2001), “Experimental measurement and finite element simulation of the interaction between residual stress and mechanical loading”, *Int J Fatigue* 2001;23, pp. 293–302.
19. DNV-RP-C203 (2012), *Fatigue Design of Offshore Steel Structures*.
20. D. Rao, D. Wang (2007), “The effectiveness evaluation of 314L stainless steel vibratory stress relief by dynamic stress”, *International Journal of Fatigue* 29, pp. 192–196.
21. D. Rao, L. Chen (2004), “Vibratory Stress Relief in manufacturing the Rails of Maglev system”, *Journal of Manufacturing science and Engineering*, 126, Issue-2, pp. 388-391.
22. D. Tawfik, P. J. Mutton, W.K. Chiu (2008), “Experimental and numerical investigations: alleviating tensile residual stresses in flash-butt

- welds by localised rapid post-weld heat treatment”, *J. Mater. Process. Technol*, 196, pp. 279–291.
23. D. X. Fang, F.H. Sun, Z.K. Gong (1991), “Improving fatigue life of welded components by vibratory stress relief technique”, *J Experiment Mech*, 6, pp. 89–95.
 24. E. Friedman (1975), "Thermomechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Method", *Trans, of ASME*, paper 75-PVP-27, 1975, 1-8
 25. G. A. Webster and A. N. Ezeilo (2001), “Residual Stress Distributions and Their Influence on Fatigue Lifetimes”, *International Journal of Fatigue*, 23, Suppl. 1, pp. S375-S383; doi:10.1016/S0142-1123(01)00133-5.
 26. GB T25731-2010 *Grain and oil machinery*. Raising file evaporator.
 27. G. Huang, Q. Zhang, B. Zhang, S. Li (2021), “Microscopic mechanism of the combined magnetic-vibration treatment for residual stress reduction”, *Results in Physics*, 29, October 2021, 104659, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104659>.
 28. G. P. Wozney, G.R. Crawmer (1968), “An investigation of vibrational stress relief in steel”, *Weld Int* 1968;47(9).
 29. G. S. Schajer (2013), *Practical residual stress measurement methods*, Willey & son.
 30. G. R. Liu and S. S. Quek (2003), *The Finite Element Method. A practical course*, An imprint of Elsevier Science, First published 2003. ISBN07506 58665.
 31. H. J. Gao, Y. D. Zhang, Q. Wu, and J. Song (2017), “Experimental Investigation on the Fatigue Life of Ti-6Al-4V Treated by Vibratory Stress Relief”, *Metals*, 7, 158; doi:10.3390/met7050158.

32. H. J. Gao, Y. Zhang, Q. Wu, J. Song, K. Wen (2018), “Fatigue life of 7075-T651 aluminium alloy treated with vibratory stress relief”, *International Journal of Fatigue*, 108, March 2018, pp. 62-67, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.11.011>.
33. H. Song, H. Gao, Q. Wu, Y. Zhang (2021), “Effects of segmented thermal-vibration stress relief process on residual stresses mechanical properties and microstructures of large 2219 Al alloy rings”, *Journal of Alloys and Compounds*, 886, 15 December 2021, 161269, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161269>.
34. <http://www.stressreliefengr.com/customer.html>, (tháng 11 năm 2021)
35. IIW document IIW-2259-15 ex XIII-2460-13/XV-1440-13, Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components.
36. I. U. Musa, M. O. Afolayan, I. M. Dagwa (2016), “Finite element model for predicting residual stresses in shielded manual metal arc welding of mild steel plates”, *Nigerian journal of technology*, 35, no. 1, pp. 85 – 90; <http://dx.doi.org/10.4314/njt.v35i1.14>.
37. J. K. Jacobus, R. E. DeVor, and S. G. Kapoor (2000), “Machining Induced Residual Stress, Experimentation and Modeling”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 122, pp. 20-31.
38. J. Goodman (1899), *Mechanics Applied to Engineering*. Longmans, Green & Company, London.
39. J. L. Hansen (2003), *Numerical modelling of welding induced stresses*, PhD Thesis, Department of Manufacturing Engineering and Management, Technical University of Denmark.
40. J. P. Holman (1976), *Heat Transfer*, Fourth Edition, McGraw-Hill, New York.

41. J. Song, Y. Zhang (2016), “Effect of vibratory stress relief on fatigue life of aluminum alloy 7075-T651”, *Adv. Mech. Eng*, 8, pp. 1–9.
42. J. Xu, L. Chen, C. Ni (2007), “Effect of vibratory weld conditioning on the residual stresses and distortion in multipass girth-butt welded pipes”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 84, pp. 298–303.
43. Klauba (1983), US Patent 4831673, 05/1983.
44. L. Shi, A. H. Price, and W. Nguyen Hung (2018), “use of contour method for welding residual stress assessment”, *Procedia Manufacturing*, 26, pp. 276–285.
45. L. Stefan, J. Holmgren (2007), *Alternative Methods for Heat Stress Relief*, Master of science programme Mechanical Engineering, Lulea 14th.
46. M. A. Miner (1945), "Discussion: “Cumulative Damage In Fatigue”", *ASME*, 12, Issue 2, pp. A159–A164, <https://doi.org/10.1115/1.4009555>.
47. Musschot (1988), US Patent 4718473, 01/1988.
48. M. N. Ilman, R. A. Sriwijaya, M. R. Muslih, N. A. Triwibowo, Sehonno (2020), “Strength and fatigue crack growth behaviours of metal inert gas AA5083-H116 welded joints under in-process vibrational treatment”, *Journal of Manufacturing Processes*, 59, November 2020, pp. 727-738, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.035>.
49. Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method, Tech Note TN-503, Micro-Measurements, Raleigh, NC.
50. M. S. RAMOS (2003), “Effect of single and multiple overloading on the residual fatigue life of a structural steel”, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 26, Issue 2, pp. 115–121.

51. M. Shalvandi, Y. Hojjat, A. Abdullah, H. Asadi (2013), “Influence of ultrasonic stress relief on stainless steel 316 specimens: A comparison with thermal stress relief”, *Materials and Design* 46, pp. 713–723.
52. Ninh T. Nguyen (1986), *Advanced modelling of the Fatigue of butt-welded structure*, Degree of Doctor of Philosophy, Australia.
53. O. C. Zienkiewicz (1977), *The Finite Element Method*, McGraw-Hill Company, London.
54. O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor and F. David (2014), *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*, Related publications, <https://doi.org/10.1016/C2009-0-26332-X>.
55. P. Colegrove (2009), “The welding process iMPact on residual stress and distortion”, *The Science and Technology of Welding and Joining*, 14.
56. P. J. Withers (2001), “Residual stress. Part 2 – Nature and origins”, *Materials Science and Technology*, 17, Issue 4, pp. 366-375.
57. P. R. Serchulk (1993), “The influence of radiant heating on temperature schemes and residual stress under high temperature spray coating ”, *Acta Materiala*, 63, 3, pp. 371-374.
58. Q. Zhang, L. Yu, X. Shang, S. Zhao (2020), “Residual stress relief of welded aluminum alloy plate using ultrasonic vibration”, *Ultrasonics*, 107, September 2020, 106164, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106164>.
59. R. Dawson, D. G. Moffat (1980), “Vibratory stress relief and fundamental study of its effectiveness”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 102(2), pp. 169-176.

60. R. T. McGoldrick, H. E. Saunders (1943), "Some Experiments In Stress Relieving Castings and welded structuresby Vibration", *Journal of the American Society for Naval Engineers*, 55, pp. 589–609.
61. S. P. Dasgupta (1980), *Computation of Rayleigh Damping Coefficients for Large Systems*, India.
62. S. Li, H. Fang (2018), "Vibration stress relief of DH 36 rectangle welded plates", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 322, 042002, doi:10.1088/1757-899X/322/4/042002.
63. S. M. Y. Munsif, J. Waddell, C. Walker (2001), "The Influence of Vibratory Treatment on the Fatigue Life of Welds: A Comparison with Thermal Stress Relief", *Strain*, 37, pp. 141–149.
64. S. Weiss, G. Baker, R. D. Gupta (1976), "Vibrational residual stress relief in a plain carbon steel weldment", *Weld Int* 1976, pp. 47–54.
65. Thompson, US Patent 3622404. 11/1971
66. US Patent 3427872A, 10/1966.
67. W. A. Weibull (1939), *A statistical theory of the strength of material*, Proc. Royal Swedish institute for Engineer Research, Stockholm, N^o 151, pp.45.
68. W. Hahn (2002), "Report on Vibratory Stress and Modifications in Materials to Conserve Resources and Prevent Pollution", *Alfred University*, Center for Environmental and Energy Research (CEER).
69. Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, O. Gushcha, V. Smilenko and V. Brodoviy (2004), "Ultrasonic Technique and Device for Residual Stress Measurement", *X International Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics*, Costa Mesa, California USA, June 7-10.

70. Y. P. Lu, Z.Y. Ma, Q.S. Jia (2001), “*Research on vibratory stress relief mechanism*”, J Mech Sci Tech, 20, pp. 587–589.
71. Y. P. Yang, G. Jung, R. Yancey (2005), “Finite Element Modeling of Vibration Stress Relief after Welding”, *Presented at the American Society of Materials*.
72. Y. Wang, W. Qu, E. Zhao and L. Wang (2014), “Fatigue Life Numerical Prediction of Butt Welded Plate Under Cyclic Loading” , *Advanced Materials Research*, 838-841, pp. 265-269.
73. Y. Y. Zhu and S. Cescotto (1994), "Transient Thermal and Thermo-mechanical Analysis by Mixed FEM", *Computers and Structures*, 53.
74. Y. Zhou, L. Yang (2014), “Micro- and Macromechanical Properties of Materials”, *CRC Press*.
75. Z. Bofang (2018), *The Finite Element Method, Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering*, First published 2018 by John Wiley & Sons Singapore. ISBN: 9781119107316.

Tài liệu tiếng Nga

76. Буй Мань Кыонг, О. В. Репецкий, (2011), “Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ”, № 2011613210. Схематизация случайных процессов нагружения и расчет на усталостную прочность (DAFLAPS_Fatiguelife). Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
77. В. В. Болотин (1984), *Прогнозирование ресурса машин и конструкций*. М.: Машиностроение.
78. В. П. Когаев (1977), *Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени*, Библиотека расечика -М., Машиностроение 232с.

79. В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков (1985), *Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность*, М.: Машиностроение.
80. В. С. Кравчук (2000), *Сопротивление деформированию и разрушению поверхностно-упрочненных деталей машин и элементов конструкций*, Астропринт, 2000 ISBN 966-549-515-1.
81. *Методы исследования сопротивления металлов деформированию и разрушению при циклическом нагружении* (1974). –Киев, “Наукова думка”, 254 с.
82. О. В. Репецкий, Буй Мань Кьонг (2012), “Прогнозирование усталостной прочности рабочих лопаток турбомашин”, *Дюссельдорф: Palmarium academic publishing*.
83. Серенсен, Когаев, Шнейдерович (1975), *Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность*, Руководство и справочное пособие. М Машиностроение, Москва.

PHỤ LỤC

Phụ lục 1: Phân bố ứng suất dư trên mặt cắt A-A sau rung khử

Phụ lục 2: Kết quả kiểm tra, đo đặc vật liệu

Phụ lục 3: Kéo mẫu kiểm tra cơ tính

Phụ lục 4: Kiểm tra tần số chi tiết mẫu

Phụ lục 5: Đo ứng suất dư chi tiết mẫu

Phụ lục 6: Tần số cộng hưởng của mẫu sau các lần khử ứng suất dư

Phụ lục 7: Tính hệ số cản Raylengh

Phụ lục 8: Chương trình **FEM-Thermalstress-Vibration**

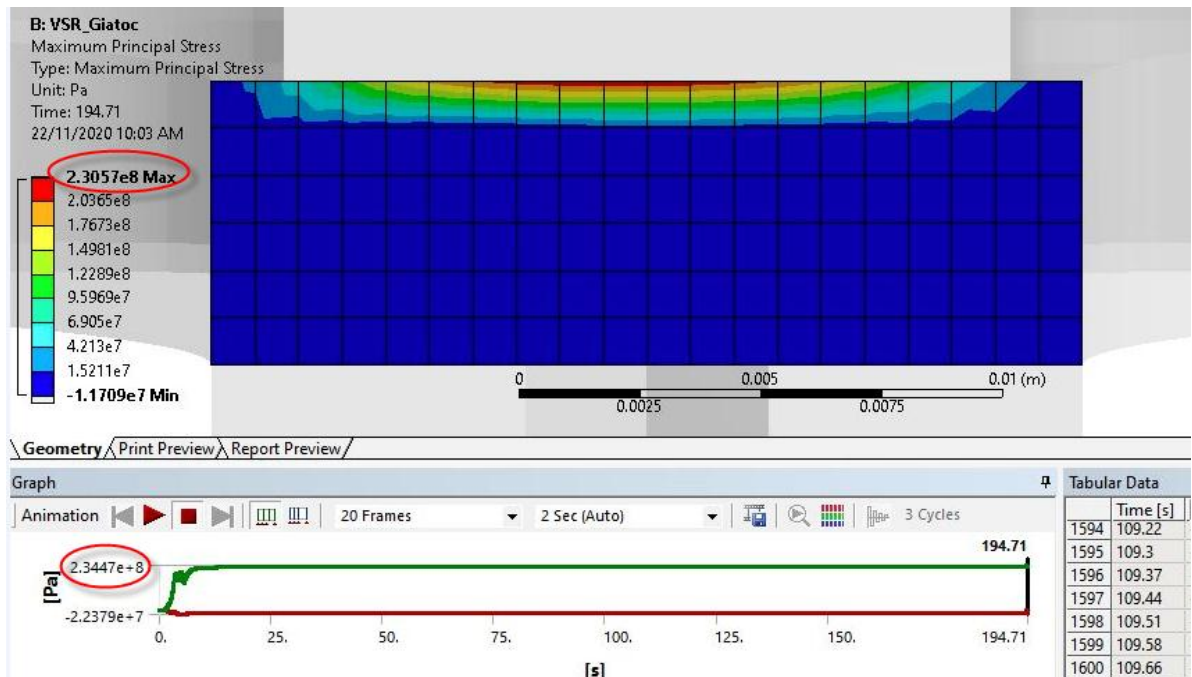
Phụ lục 9: Chương trình **FEM-Fatigue**

Phụ lục 10: Thiết bị thí nghiệm và đo

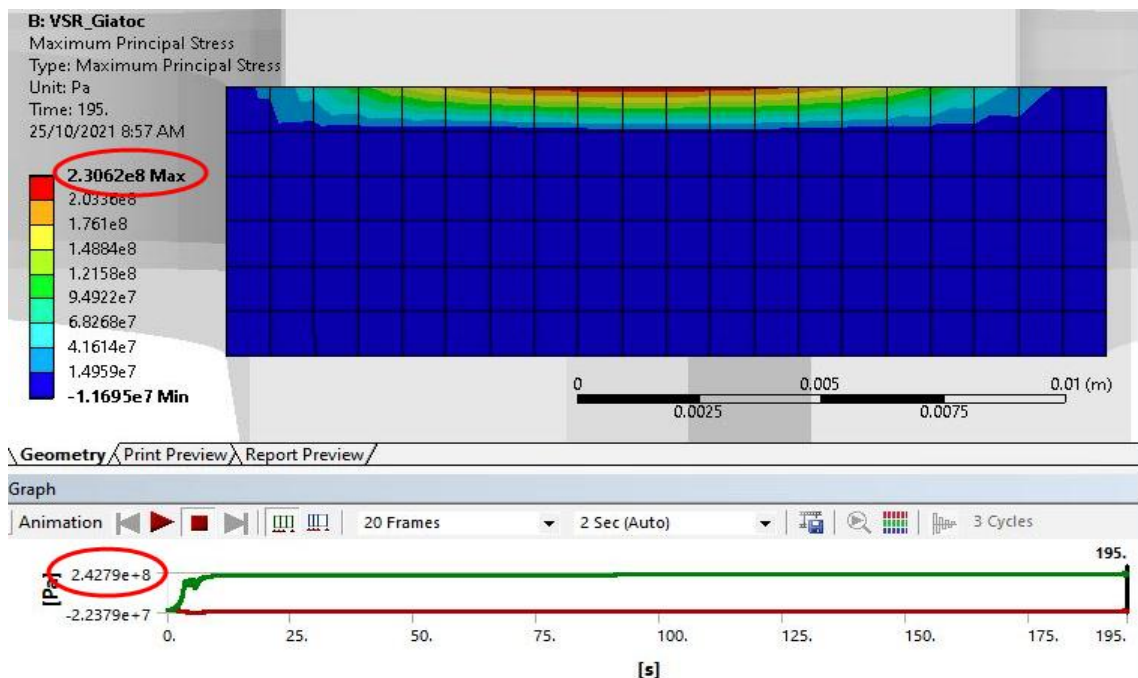
Phụ lục 11: Cơ sở xác định ứng suất dư

Phụ lục 12: Tính tuổi thọ của chi tiết mẫu theo các đường cong mỏi

Phụ lục 1: Phân bố ứng suất dư trên mặt cắt A-A sau rung khử

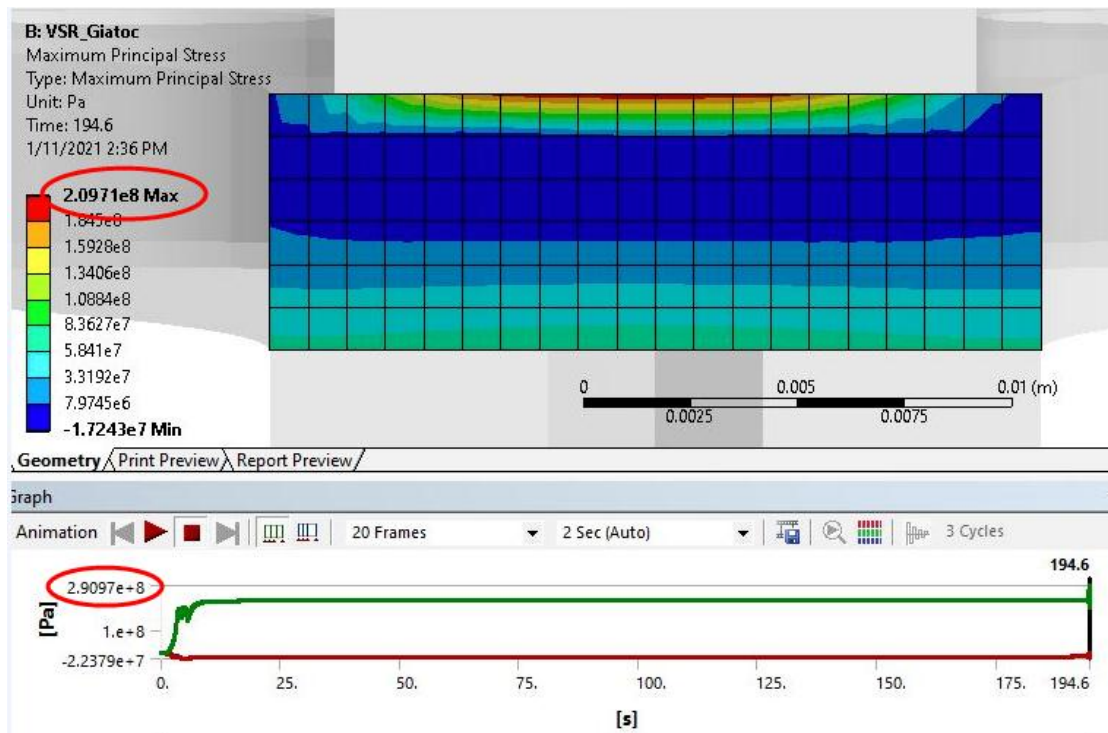


a) Ứng suất tổng thấp hơn giới hạn chảy 20%

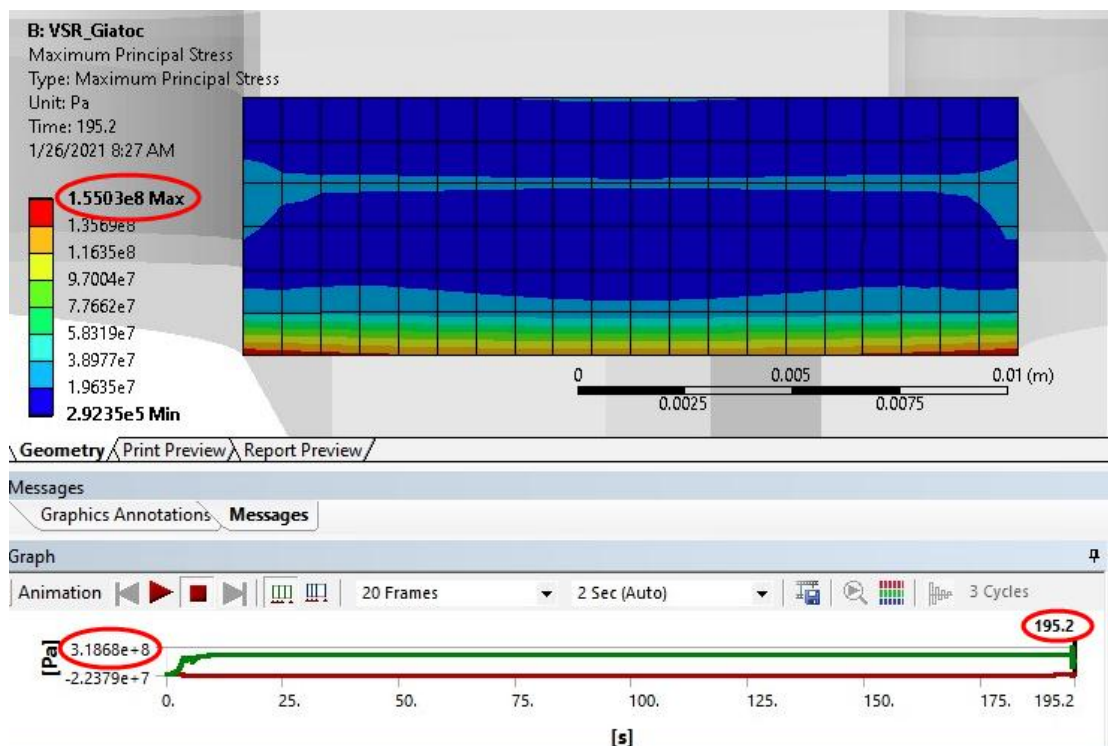


b) Ứng suất tổng thấp hơn giới hạn chảy 10%

2-PL

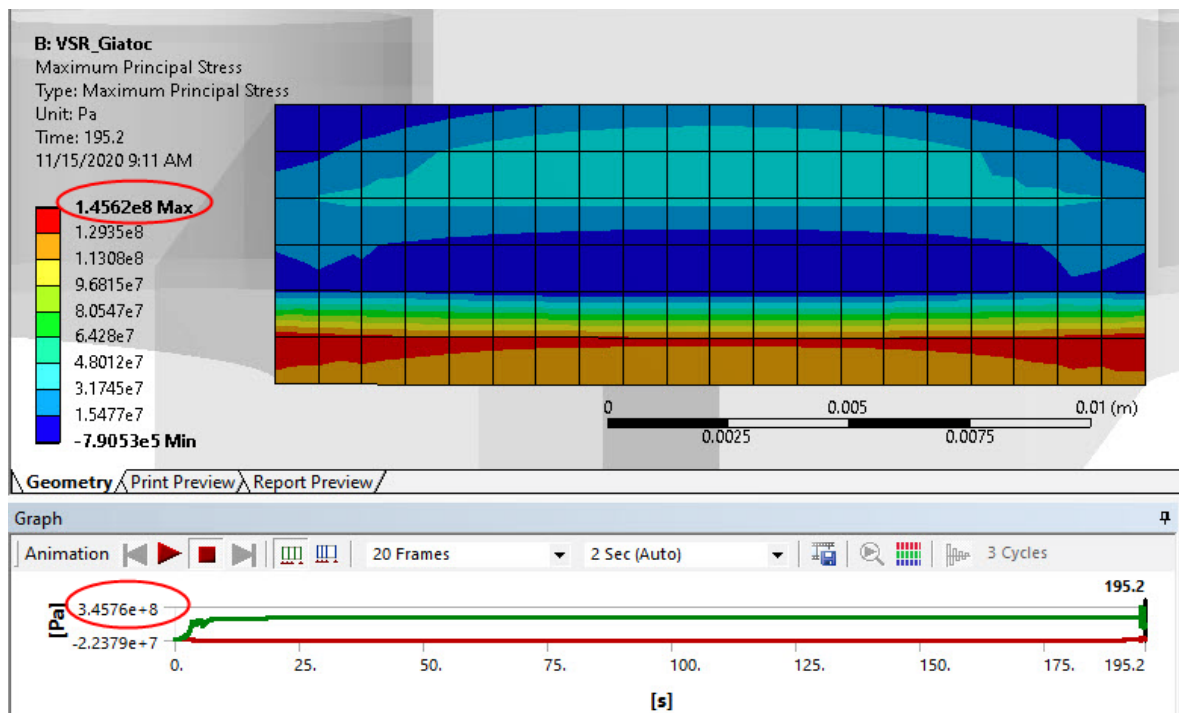


c) Ứng suất tổng bằng giới hạn chảy

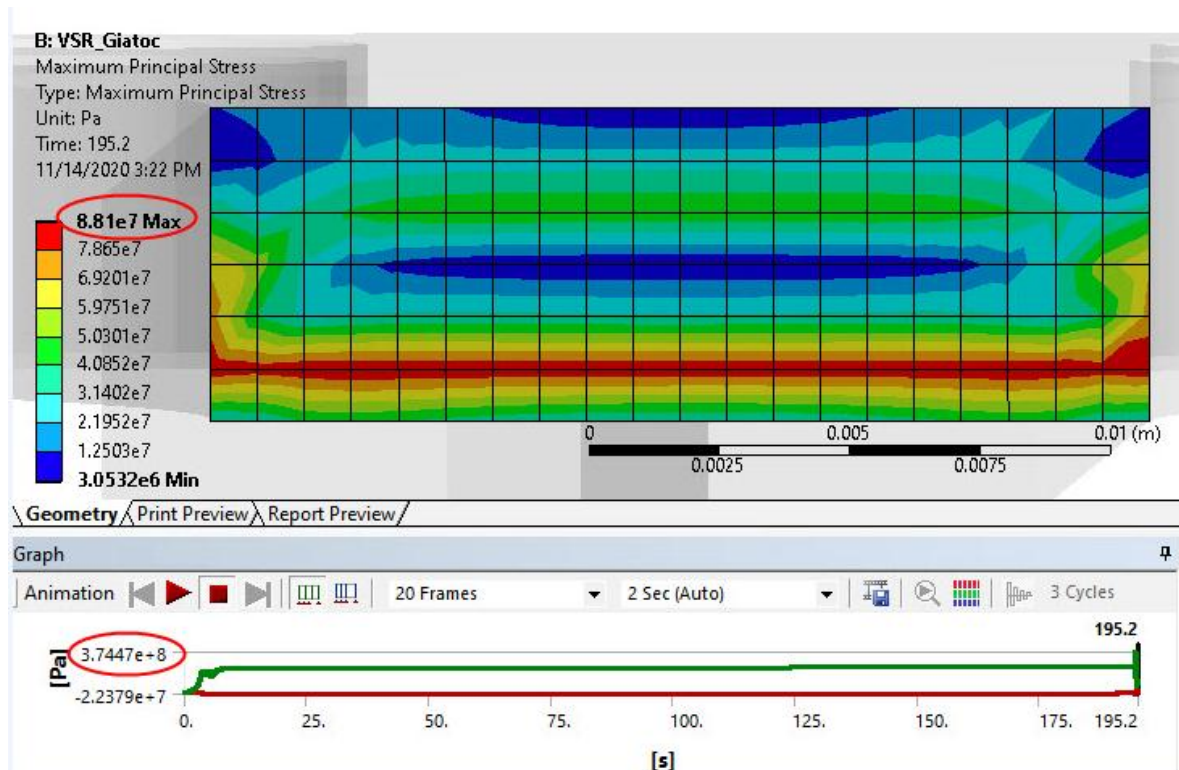


c) Ứng suất tổng vượt giới hạn chảy 10%

3-PL

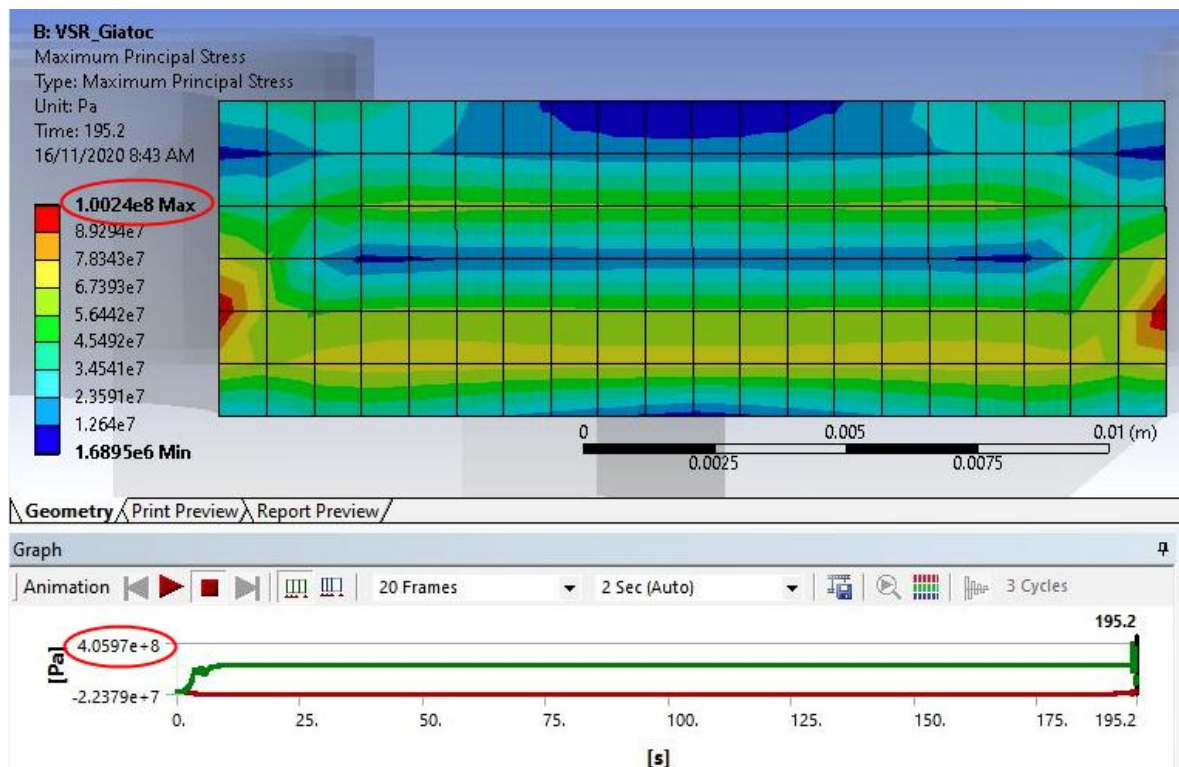


d) Ứng suất tổng vượt giới hạn chảy 20%

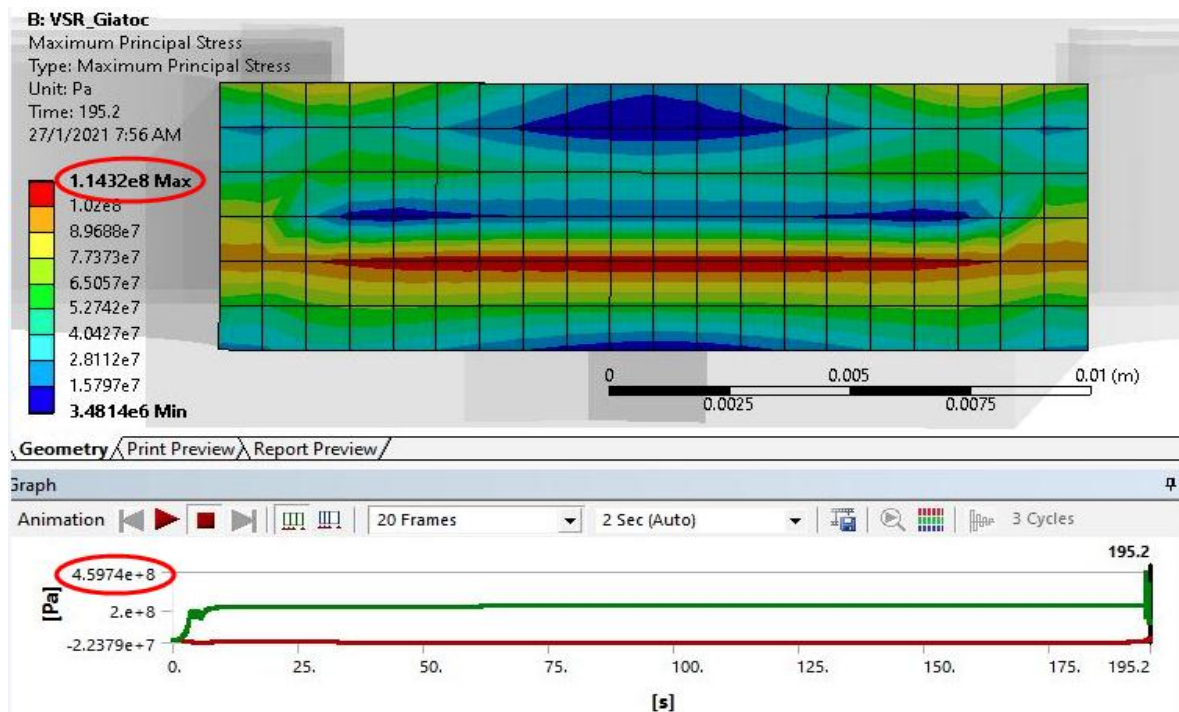


e) Ứng suất tổng vượt giới hạn chảy 30%

4-PL

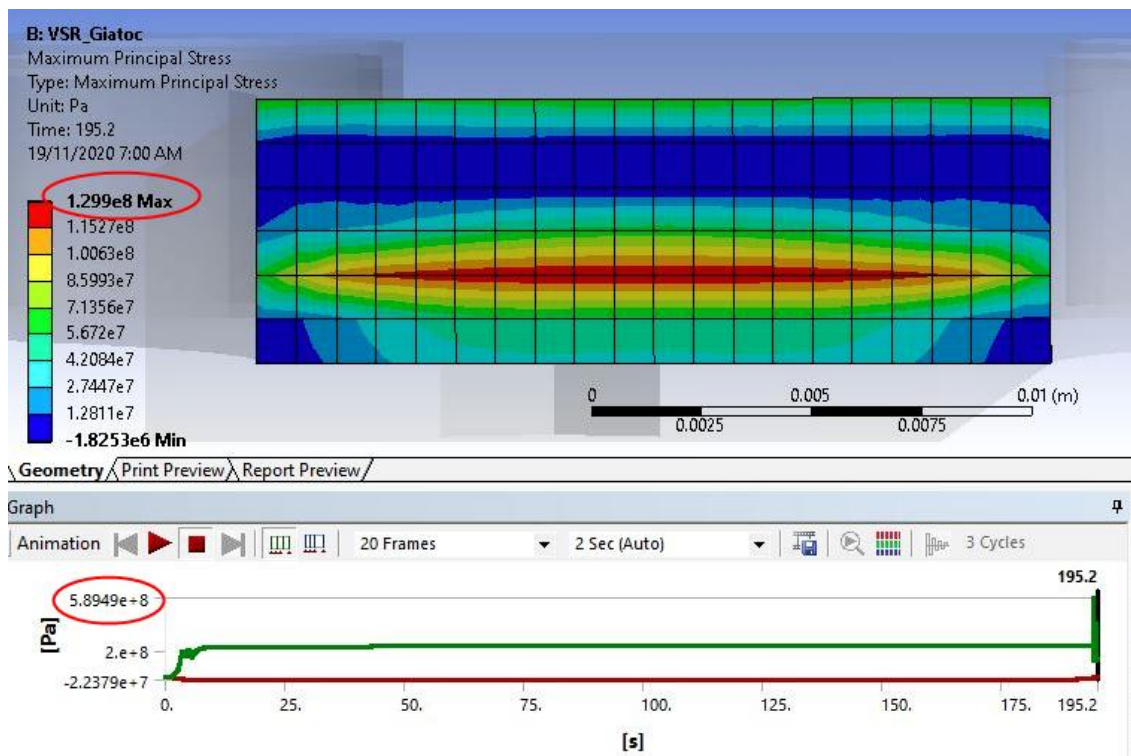


f) Ứng suất tổng vượt giới hạn chảy 40%



g) Ứng suất tổng vượt giới hạn chảy 60%

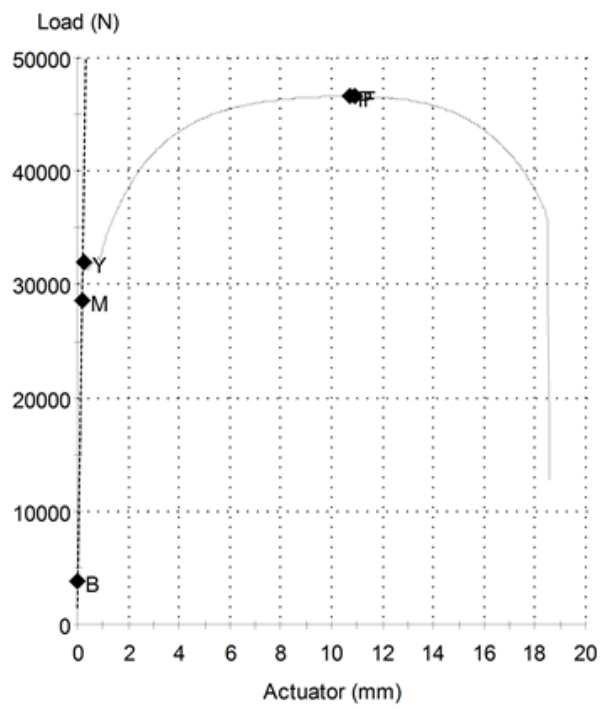
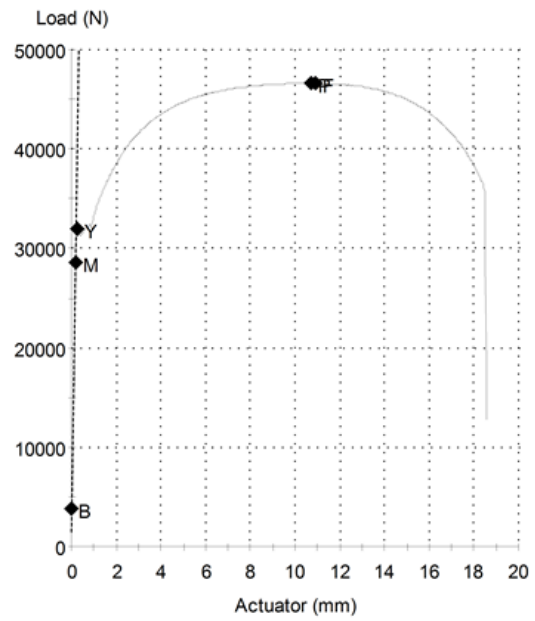
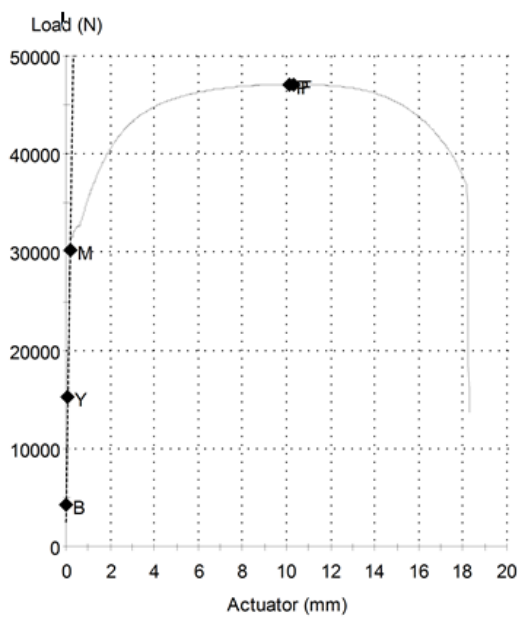
5-PL

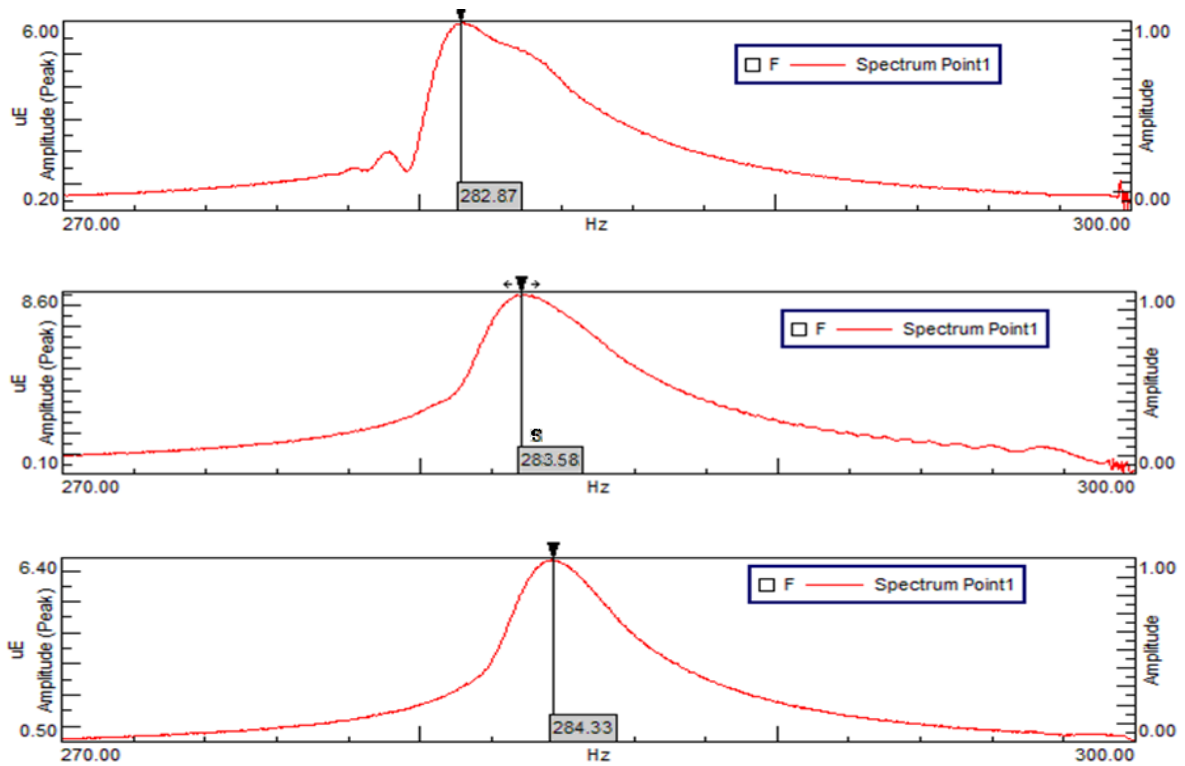


h) Ứng suất tổng vượt giới hạn chảy 100%

Phụ lục 2: Kết quả kiểm tra, đo đạc vật liệu

 VIỆN KHOA HỌC VẬT LIỆU INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE TRUNG TÂM ĐÁNH GIÁ HƯ HỒNG VẬT LIỆU CENTER OF MATERIAL AND FAILURE ANALYSIS		Địa chỉ (Add): <i>Tầng 5, Nhà B2, Số 18 Hoàng Quốc Việt, Quận Cầu Giấy, Hà Nội</i> Điện thoại/Tel: 024 - 3791 1673 Fax: 024 - 3791 5289 Website: www.comfa.vn Email: comfa@ims.vast.ac.vn							
		Yêu cầu số/Request No: P06/20							
		Trang/Page: 1/1							
BÁO CÁO PHÂN TÍCH/KIỂM TRA TEST/ANALYSIS REPORT									
1. Khách hàng/Customer:	Đỗ Văn Sĩ	4. Số lượng mẫu/Quantity:	01						
2. Địa chỉ/Address:	236 Hoàng Quốc Việt, Bắc Từ Liêm, Hà Nội	6. Ngày nhận mẫu/Date of request:	04/02/2020						
3. Tên mẫu/Sample's name:	Mẫu thép số 2	8. Ngày trả kết quả/Date of issue:	04/02/2020						
5. Phương pháp/Method:	ASTM E415-17	10. Ngày thực hiện/Tested date:	04/02/2020						
7. Thiết bị/Equipment:	SPECTROTEST								
9. Địa điểm thực hiện/Performance location:	Trung tâm Đánh giá hư hỏng vật liệu <i>Center of Material and Failure Analysis</i>								
Kết quả phân tích của mẫu trên được trình bày dưới đây/The analysis results of above samples are as follows:									
									
Hình 1: Hình ảnh mẫu phân tích									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
Ave, %	0.1452	0.0087	0.4483	0.0139	0.0028	0.0054	0.0030	0.0091	0.0723
	Co	Cu	Ti	V	Nb	W	Pb	Fe	
Ave, %	0.0080	0.0118	<0.0010	<0.0020	0.0041	0.0470	<0.0100	99.183	

Phụ lục 3: Kéo mẫu kiểm tra cơ tính

Phụ lục 4: Kiểm tra tần số chi tiết mẫu

Phụ lục 5: Giá trị ứng suất dư của chi tiết mẫu đo bằng thiết bị RS200

a) USD trước rung khử

```

Data Title

Rosette type           = 062 RE           Rosette mean diameter = 5.13 mm
Young's modulus        = 200.0 GPa        Hole diameter         = 2.000 mm
Poisson's ratio        = 0.300
Yield stress           = 290 MPa

Rms strain misfit      = 15.6 ue

beta=angle Smax clockwise from gage 1    y = calc. stress exceeds 60% yield

--- STRAINS --- 90% ----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----
Depth    e1    e2    e3 prob. Smax  Smin  Tmax  beta    SX    SY    TXY
mm       ue    ue    ue bound MPa   MPa   MPa   deg    MPa   MPa   MPa
0.000    0     0     0          230  -263  246    90   -263  230   -2   y
0.040    10    -1    -27

```

```

-----

Data Title

Rosette type           = 062 RE           Rosette mean diameter = 5.13 mm
Young's modulus        = 200.0 GPa        Hole diameter         = 1.904 mm
Poisson's ratio        = 0.300
Yield stress           = 290 MPa

Rms strain misfit      = 14.0 ue

beta=angle Smax clockwise from gage 1    y = calc. stress exceeds 60% yield

--- STRAINS --- 90% ----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----
Depth    e1    e2    e3 prob. Smax  Smin  Tmax  beta    SX    SY    TXY
mm       ue    ue    ue bound MPa   MPa   MPa   deg    MPa   MPa   MPa
0.000    0     0     0          203  -76   139    42    79    48  -138  y
0.040   -1    -2     0

```

10-PL

Data Title

Rosette type = 062 RE Rosette mean diameter = 5.13 mm
 Young's modulus = 200.0 GPa Hole diameter = 1.904 mm
 Poisson's ratio = 0.300
 Yield stress = 290 MPa

Rms strain misfit = 14.0 ue

beta=angle Smax clockwise from gage 1 y = calc. stress exceeds 60% yield

Depth mm	--- STRAINS --- 90%			----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----						
	e1 ue	e2 ue	e3 prob. ue bound	Smax MPa	Smin MPa	Tmax MPa	beta deg	SX MPa	SY MPa	TXY MPa
0.000	0	0	0	203	-76	139	42	79	48	-138 y
0.040	-1	-2	0							

b) USD sau rung vượt giới hạn chảy <5%

Data Title

Rosette type = 062 RE Rosette mean diameter = 5.13 mm
 Young's modulus = 200.0 GPa Hole diameter = 1.822 mm
 Poisson's ratio = 0.300
 Yield stress = 290 MPa

Rms strain misfit = 16.4 ue

beta=angle Smax clockwise from gage 1 y = calc. stress exceeds 60% yield

Depth mm	--- STRAINS --- 90%			----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----						
	e1 ue	e2 ue	e3 prob. ue bound	Smax MPa	Smin MPa	Tmax MPa	beta deg	SX MPa	SY MPa	TXY MPa
0.000	0	0	0	228	-220	224	-89	-220	228	7 y
0.040	19	-3	-30							

c) USD sau rung vượt giới hạn chảy 4%

Data Title

Rosette type = 062 RE Rosette mean diameter = 5.13 mm
 Young's modulus = 200.0 GPa Hole diameter = 1.863 mm
 Poisson's ratio = 0.300
 Yield stress = 290 MPa

Rms strain misfit = 11.5 ue

beta=angle Smax clockwise from gage 1

Depth mm	--- STRAINS --- 90%			----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----						
	e1 ue	e2 ue	e3 prob. ue bound	Smax MPa	Smin MPa	Tmax MPa	beta deg	SX MPa	SY MPa	TXY MPa
0.000	0	0	0	147	-60	104	-73	-42	129	59
0.040	-6	5	-9							

d) USD sau rung vượt giới hạn chảy 10%

```

Data Title

Rosette type           = 062 RE           Rosette mean diameter = 5.13 mm
Young's modulus         = 200.0 GPa        Hole diameter          = 1.739 mm
Poisson's ratio         = 0.300
Yield stress            = 290 MPa

Rms strain misfit      = 8.5 ue

beta=angle Smax clockwise from gage 1

--- STRAINS --- 90% ----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----
Depth   e1    e2    e3 prob. Smax   Smin   Tmax   beta   SX    SY    TXY
mm      ue    ue    ue bound MPa    MPa    MPa    deg   MPa   MPa   MPa
0.000   0     0     0          169  -135   152    -61   -62    96   130
0.040   5     3    -3

```

e) USD sau rung vượt giới hạn chảy 20%

```

Data Title

Rosette type           = 062 RE           Rosette mean diameter = 5.13 mm
Young's modulus         = 200.0 GPa        Hole diameter          = 1.863 mm
Poisson's ratio         = 0.300
Yield stress            = 290 MPa

Rms strain misfit      = 11.5 ue

beta=angle Smax clockwise from gage 1

--- STRAINS --- 90% ----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----
Depth   e1    e2    e3 prob. Smax   Smin   Tmax   beta   SX    SY    TXY
mm      ue    ue    ue bound MPa    MPa    MPa    deg   MPa   MPa   MPa
0.000   0     0     0          147  -60   104    -73   -42   129   59
0.040  -6     5    -9

```

f) USD sau rung vượt giới hạn chảy 30%

```

Data Title

Rosette type           = 062 RE           Rosette mean diameter = 5.13 mm
Young's modulus         = 200.0 GPa        Hole diameter          = 1.738 mm
Poisson's ratio         = 0.300
Yield stress            = 290 MPa

Rms strain misfit      = 14.7 ue

beta=angle Smax clockwise from gage 1    Y = calc. stress exceeds yield

--- STRAINS --- 90% ----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----
Depth   e1    e2    e3 prob. Smax   Smin   Tmax   beta   SX    SY    TXY
mm      ue    ue    ue bound MPa    MPa    MPa    deg   MPa   MPa   MPa
0.000   0     0     0          58  -332   195    77   -314    39  -83 Y
0.040  17     0   -11

```

h) USD sau rung vượt giới hạn chảy 40%

```

Data Title

Rosette type           = 062 RE           Rosette mean diameter = 5.13 mm
Young's modulus        = 200.0 GPa        Hole diameter         = 1.656 mm
Poisson's ratio        = 0.300
Yield stress           = 290 MPa

Rms strain misfit      = 7.7 ue

beta=angle Smax clockwise from gage 1    y = calc. stress exceeds 60% yield

--- STRAINS --- 90% ----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----
Depth    e1    e2    e3 prob. Smax  Smin  Tmax  beta   SX    SY    TXY
mm       ue    ue    ue bound MPa   MPa   MPa   deg   MPa   MPa   MPa
0.000    0     0     0          66   -225   146    85   -223   64   -25  y
0.040    1     0     0

```

g) USD sau rung vượt giới hạn chảy 60%

```

Data Title

Rosette type           = 062 RE           Rosette mean diameter = 5.13 mm
Young's modulus        = 200.0 GPa        Hole diameter         = 1.822 mm
Poisson's ratio        = 0.300
Yield stress           = 290 MPa

Rms strain misfit      = 3.2 ue

beta=angle Smax clockwise from gage 1

--- STRAINS --- 90% ----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----
Depth    e1    e2    e3 prob. Smax  Smin  Tmax  beta   SX    SY    TXY
mm       ue    ue    ue bound MPa   MPa   MPa   deg   MPa   MPa   MPa
0.000    0     0     0          99   -23    61   -88   -22    99    5
0.040   -1    -2    -5

```

i) USD sau rung vượt giới hạn chảy 80%

```

Data Title

Rosette type           = 062 RE           Rosette mean diameter = 5.13 mm
Young's modulus        = 200.0 GPa        Hole diameter         = 1.822 mm
Poisson's ratio        = 0.300
Yield stress           = 290 MPa

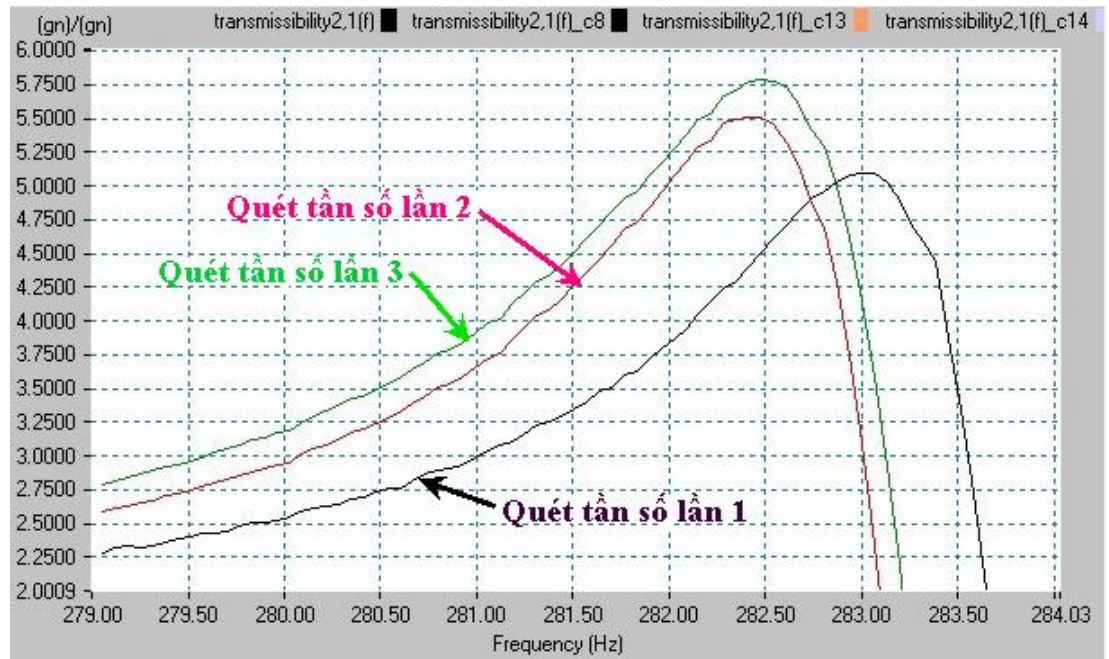
Rms strain misfit      = 14.7 ue

beta=angle Smax clockwise from gage 1

--- STRAINS --- 90% ----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----
Depth    e1    e2    e3 prob. Smax  Smin  Tmax  beta   SX    SY    TXY
mm       ue    ue    ue bound MPa   MPa   MPa   deg   MPa   MPa   MPa
0.000    0     0     0         103  -113   108   -81  -107    98   34
0.040    2    -3    -4

```


Phụ lục 6: Tần số cộng hưởng của mẫu sau các lần khử ứng suất dư



Phụ lục 7: Tính hệ số cản Rayleigh

- Đo các giá trị tần số cộng hưởng và các hệ số suy giảm tương đối tại mode 1: $\omega_1 (rad / s), \zeta_1 (\%)$ và mode 2: $\omega_2 (rad / s), \zeta_2 (\%)$.

- Tính hệ số cản độ cứng:

$$\beta = \frac{2\zeta_1\omega_1 - 2\zeta_2\omega_2}{\omega_1^2 - \omega_2^2}$$

- Tính hệ số cản khối lượng

$$\alpha = \beta\omega_1^2 - 2\zeta_1\omega_1$$

Phụ lục 8: Chương trình FEM- Fatigue

```

clc
format long
tic
%=====Nhap thong so dau
vao=====
%-----Cac he so anhhuong-----
-----
Kf= 1.0 ; % he so cong nghe gia cong be mat
Kv= 1 ; % he so giam tinh chat co hoc cua vat lieu
xicmaB=440; %gioi han ben vat lieu
v_xima=0.15;
anfa=(1/v_xima)-0.64; % thong so phan bo
%-----thong so cho mau-----
-----
coord=load('LV-Toado.txt'); % Toa do cac nut (x,y,z)
Nodes_vao=load('LV-ChisoNutVat.txt'); % chi so nut
phan tu
Nodes=Nodes_vao;
USTinh1=load('LV-Taitinh6gfix.txt');
USTinh=USTinh1*(1); %0.00001
MaxUSTai=max(USTinh(:,2));
USdu_truocrung=load('A36-USchinh0g0s.txt'); %A36-
USchinh0g0s
USdu_saurung=load('A36-40%-USchinh0,009(175).txt');
MaxUSdusaurung=max(USdu_saurung(:,2));
%=====tinh ung suat
tong=====
US_truocrung1=USdu_truocrung;
US_saurung1=USdu_saurung;
USmaxsaurungTongvat=max(US_saurung1(:,2));
% =====Dua thong so mat=====
    CotnutDoan=load('LV-NutmatTai0.txt');
%=====
[US_truocrung]=TachUSTheonutMat(US_truocrung1,Cotnut
Doan); %dua us nut
[US_duong_truocrung]=boUSam(US_truocrung,coord);
ungsuat_truocrung=US_duong_truocrung; % ma tran ung
suat theo nut
MaxUStuocrungLocDoan=max(ungsuat_truocrung(:,2));

```

```

%-----thong so cho chi tiet-----
[US_saurung=TachUStheonutMa(US_saurung1,CotnutDoan);
[US_duong_saurung]=boUSam(US_saurung,coord);
ungsuat_saurung= US_duong_saurung;
MaxUSSaurungLocDoan=max(ungsuat_saurung(:,2));
%-----chuong trinh tinh V0-----
[V_truocrung,ungsuat_max_truocrung]=Chuongtrinhtinh_
thetichquidoi(coord,Nodes,ungsuat_truocrung,anfa);
% -----chuong trinh tinh V-----
[V_saurung,ungsuat_max_saurung]=Chuongtrinhtinh_thet
ichquidoi(coord,Nodes,ungsuat_saurung,anfa);
%=====Ket quatinh=====
Hesotanggioihanmoisaurung = Kf*Kv*[(xicmaB-
MaxUSSaurungLocDoan/1000000)/(xicmaB-
MaxUStuocrungLocDo-
an/1000000)]*(V_truocrung/V_saurung)^(1/anfa)
toc
----- % Ket thuc chuong trinh chinh-----

function
[V,ungsuat_max]=Chuongtrinhtinh_thetichquidoi(coord,
Nodes,ungsuatmau,anfa)

    clc
    format long
    %=====Nhap cac thong so dau vao=====
    %----Thong so vat lieu va qui luat Gauss-----
    sodiemGauss=2;    % S? ?i?m Gauss theo m?t ph??ng
    three_D=4;    % ki?u tính D cho ph?n t? 3D
    dof_nut=3;
    ep = [three_D sodiemGauss dof_nut];
    [noe,nnel]=size(Nodes);
    nnode=length(coord(:,1)); % nut cua he
    dof_e=nnel*dof_nut; % B?c t? do c?a ph?n t?
    [Dof,~]=bactudohethong(nnode,dof_nut);
    [Edof]=matran_bactudophantu(noe,dof_e,Dof,Nodes)
    ; [Ex,Ey,Ez]=coordxtr(Edof,coord,Dof,nnel);
    %====Nh?p ?ng su?t theo t?a ?? nút=====

```

18-PL

```

[ungsuatmau_e]=matranUS_e(Nodes,ungsuatmau
ungsuat_max=max(max(ungsuatmau(:,2)));
%===== Tính th? tích qui ??i c?a m?u V0=====
V0=0;
for iel=1:noe
ex=Ex(iel,:);      ey=Ey(iel,:);      ez=Ez(iel,:);
es_e=ungsuatmau_e(iel,:);
[Ve]=Tinh_Ve(ex,ey,ez,ep,es_e,ungsuat_max,anfa);
V0=V0+Ve;
end
V=V0;
end
-----
function [Dof,BTD]=bactudohethong(nnode,dof_nut)
Dof=zeros(nnode,dof_nut);
BTD=0;
for i = 1:nnode
    Dof(i,1) = i*3-2;
    Dof(i,2) = i*3-1;
    Dof(i,3) = i*3;
    BTD = i*3;
end
-----
function [US_duong]=boUSam(US_ct_x,toadonut)
[sonut,~]=size(toadonut);
for i=1:sonut
    if US_ct_x(i,2)<0
        US_ct_x(i,2)=0;
    end
end
end

```


19-PL

```

    US_duong=US_ct_x;
end
-----
function [Ex,Ey,Ez]=coordxtr(Edof,coord,Dof,nnel)
    [nel,dum]=size(Edof);
    ned=dum-1;
    [~,nsd]=size(coord);
    [n,~]=size(Dof);
    nend=ned/nnel;
    Ex=zeros(nel,nnel);Ey=zeros(nel,nnel);Ez=zeros(n
el,nnel);
    for i = 1:nel
        nodnum=zeros(1,nnel);
        for j = 1:nnel
            check=Dof(:,1:nend)-ones(n,1)*Edof(i,(j-
1)*nend+2:j*nend+1);
            [indx,~]=find(check==0);
            nodnum(j)=indx(1);
        end
        Ex(i,:)=coord(nodnum,1)';
        if nsd>1
            Ey(i,:)=coord(nodnum,2)';
        end
        if nsd>2
            Ez(i,:)=coord(nodnum,3)';
        end
    end
end
-----
function [Gausspoint,Gaussweight] = GaussQuadra-
ture(order)
    switch order

```

```

case 'third'
  Gausspoint = [-sqrt(3/5)      -sqrt(3/5)      -
sqrt(3/5);
    0      -sqrt(3/5) -sqrt(3/5);
sqrt(3/5)  -sqrt(3/5) -sqrt(3/5);
-sqrt(3/5)  0      -sqrt(3/5);
0      0      -sqrt(3/5);
sqrt(3/5)  0      -sqrt(3/5);
-sqrt(3/5)  sqrt(3/5) -sqrt(3/5);
0      sqrt(3/5) -sqrt(3/5);
sqrt(3/5)  sqrt(3/5) -sqrt(3/5);
-sqrt(3/5)  -sqrt(3/5) 0;
0      -sqrt(3/5) 0;
sqrt(3/5)  -sqrt(3/5) 0;
-sqrt(3/5)  0      0;
0      0      0;
sqrt(3/5)  0      0;
-sqrt(3/5)  sqrt(3/5) 0;
0      sqrt(3/5) 0;
sqrt(3/5)  sqrt(3/5) 0;
-sqrt(3/5)  -sqrt(3/5) sqrt(3/5);
0      -sqrt(3/5) sqrt(3/5);
sqrt(3/5)  -sqrt(3/5) sqrt(3/5);
-sqrt(3/5)  0      sqrt(3/5);
0      0      sqrt(3/5);
sqrt(3/5)  0      sqrt(3/5);
-sqrt(3/5)  sqrt(3/5) sqrt(3/5);
0      sqrt(3/5) sqrt(3/5);
sqrt(3/5)  sqrt(3/5) sqrt(3/5)];

```

21-PL

```

        Gaussweight = [125/729 ; 200/729 ; 125/729 ;
200/729 ; 320/729; 200/729 ; 125/729; 200/729;
125/729;...
        200/729; 320/729; 200/729; 320/729;
512/729; 320/729; 200/729; 320/729; 200/729;...
        125/729; 200/729; 125/729; 200/729;
320/729; 200/729; 125/729; 200/729; 125];
    case 'second'
        Gausspoint = [-0.577350269189626 -
0.577350269189626 -0.577350269189626;
        0.577350269189626 -0.577350269189626 -
0.577350269189626;
        0.577350269189626 0.577350269189626 -
0.577350269189626;
        -0.577350269189626 0.577350269189626 -
0.577350269189626;
        -0.577350269189626 -0.577350269189626
0.577350269189626;
        0.577350269189626 -0.577350269189626
0.577350269189626;
        0.577350269189626 0.577350269189626
0.577350269189626;
        -0.577350269189626 0.577350269189626
0.577350269189626];
        Gaussweight = [1 ; 1 ; 1 ; 1 ; 1 ; 1 ; 1 ; 1];
    case 'first'
        Gausspoint = [0 0 0] ;
        Gaussweight = [8] ;
end
-----
function [Hamtoadokhongthungu-
yen]=hamkhongthunguyen_f(shape,es_e)
    nnel=length(es_e);

```

```

Hamtoadokhongthunguyen=0;
for n=1:nnel
    Hamtoadokhongthungu-
yen=Hamtoadokhongthunguyen+shape(n)*es_e(n);
end

```

```

-----
function [D]=hooke(p_type,E,v)
    if p_type==1
        Dm=E/(1-v^2)*[1 v 0;
            v 1 0;
            0 0 (1-v)/2];
    elseif p_type==2
        Dm=E/(1+v)/(1-2*v)*[1-v v v 0;
            v 1-v v 0;
            v v 1-v 0;
            0 0 0 (1-2*v)/2];;
    elseif p_type==3
        Dm=E/(1+v)/(1-2*v)*[1-v v v 0;
            v 1-v v 0;
            v v 1-v 0;
            0 0 0 (1-2*v)/2];;
    elseif p_type==4
        Dm=E/(1+v)/(1-2*v)*[1-v v v 0 0 0;
            v 1-v v 0 0 0;
            v v 1-v 0 0 0;
            0 0 0 (1-2*v)/2 0 0;
            0 0 0 0 (1-2*v)/2 0;
            0 0 0 0 0 (1-2*v)/2];
    else

```

23-PL

```

        error('Error ! Check first argument,
ptype=1,2,3 or 4 allowed')
        return
    end
    D=Dm;
end

-----

function
[detJ,invJ]=Jacobian(nnel,dshapedxi,dshapedeta,dshapedzeta,xcoord,ycoord,zcoord)
    jacobian=zeros(3,3);
    for i=1:nnel
        jacobian(1,1) = jacobian(1,1)+dshapedxi(i)*xcoord(i);
        jacobian(1,2) = jacobian(1,2)+dshapedxi(i)*ycoord(i);
        jacobian(1,3) = jacobian(1,3)+dshapedxi(i)*zcoord(i);
        jacobian(2,1) = jacobian(2,1)+dshapedeta(i)*xcoord(i);
        jacobian(2,2) = jacobian(2,2)+dshapedeta(i)*ycoord(i);
        jacobian(2,3) = jacobian(2,3)+dshapedeta(i)*zcoord(i);
        jacobian(3,1) = jacobian(3,1)+dshapedzeta(i)*xcoord(i);
        jacobian(3,2) = jacobian(3,2)+dshapedzeta(i)*ycoord(i);
        jacobian(3,3) = jacobian(3,3)+dshapedzeta(i)*zcoord(i);
    end
    detJ = det(jacobian); % Determinant of Jacobian matrix

```

```

        invJ=inv(jacobian);
end
-----

function
[Edof]=matran_bactudophantu(noe,dof_e,Dof,Nodes)
    Edof=zeros(noe,dof_e+1);
    for i=1:noe
        Edof(i,:)=[i Dof(Nodes(i,1),:) Dof(Nodes(i,2),:)
Dof(Nodes(i,3),:) Dof(Nodes(i,4),:)
Dof(Nodes(i,5),:) Dof(Nodes(i,6),:)
Dof(Nodes(i,7),:) Dof(Nodes(i,8),:)] ;
    end
-----

function
[B,N]=matranB_N(nnel,dof_e,shape,dshapedx,dshapedy,dshapedz)
    B=zeros(6,dof_e);
    N=zeros(3,dof_e);
    for i=1:nnel
        i1=(i-1)*3+1;
        i2=i1+1;
        i3=i1+2;
        B(1,i1)=dshapedx(i);
        B(2,i2)=dshapedy(i);
        B(3,i3)=dshapedz(i);
        B(4,i1)=dshapedy(i);
        B(4,i2)=dshapedx(i);
        B(5,i1)=dshapedz(i);
        B(5,i3)=dshapedx(i);
        B(6,i2)=dshapedz(i);
        B(6,i3)=dshapedy(i);
    end

```

```

    N(1,i1)=shape(i);
    N(2,i2)=shape(i);
    N(3,i3)=shape(i);
end
-----
function [ungsuatmau_e]=matranUS_e(Nodes,ungsuatmau)
    [nie,n]=size(Nodes);
    ungsuatmau_e=zeros(nie,n);
    for i = 1:nie
        ungsuatmau_e(i,:)=ungsuatmau(Nodes(i,:),2)';
    end
end
-----
function
[dshapedx,dshapedy,dshapedz]=ShapefunctionDerivatives(nnel,dshapedxi,dshapedeta,dshapedzeta,invjacob)
    dshapedx=zeros(1,nnel);dshapedy=zeros(1,nnel);
    for i=1:nnel
        dshapedx(i)=invjacob(1,1)*dshapedxi(i)+invjacob(1,2)*dshapedeta(i)+invjacob(1,3)*dshapedzeta(i);
        dshapedy(i)=invjacob(2,1)*dshapedxi(i)+invjacob(2,2)*dshapedeta(i)+invjacob(2,3)*dshapedzeta(i);
        dshapedz(i)=invjacob(3,1)*dshapedxi(i)+invjacob(3,2)*dshapedeta(i)+invjacob(3,3)*dshapedzeta(i);
    end
end
-----
function
[shape,dshapedxi,dshapedeta,dshapedzeta]=Shapefunctions(xi,eta,zeta)
    shape(1)=0.125*(1-xi)*(1-eta)*(1-zeta);
    shape(2)=0.125*(1+xi)*(1-eta)*(1-zeta);
    shape(3)=0.125*(1+xi)*(1+eta)*(1-zeta);

```

```

shape(4)=0.125*(1-xi)*(1+eta)*(1-zeta);
shape(5)=0.125*(1-xi)*(1-eta)*(1+zeta);
shape(6)=0.125*(1+xi)*(1-eta)*(1+zeta);
shape(7)=0.125*(1+xi)*(1+eta)*(1+zeta);
shape(8)=0.125*(1-xi)*(1+eta)*(1+zeta);
dshapedxi(1)=-0.125*(1-eta)*(1-zeta);
dshapedxi(2)=0.125*(1-eta)*(1-zeta);
dshapedxi(3)=0.125*(1+eta)*(1-zeta);
dshapedxi(4)=-0.125*(1+eta)*(1-zeta);
dshapedxi(5)=-0.125*(1-eta)*(1+zeta);
dshapedxi(6)=0.125*(1-eta)*(1+zeta);
dshapedxi(7)=0.125*(1+eta)*(1+zeta);
dshapedxi(8)=-0.125*(1+eta)*(1+zeta);
dshapedeta(1)=-0.25*(1-xi)*(1-zeta);
dshapedeta(2)=-0.25*(1+xi)*(1-zeta);
dshapedeta(3)=0.25*(1+xi)*(1-zeta);
dshapedeta(4)=0.25*(1-xi)*(1-zeta);
dshapedeta(5)=-0.125*(1-xi)*(1+zeta);
dshapedeta(6)=-0.125*(1+xi)*(1+zeta);
dshapedeta(7)=0.125*(1+xi)*(1+zeta);
dshapedeta(8)=0.125*(1-xi)*(1+zeta);
dshapedzeta(1)=-0.125*(1-xi)*(1-eta);
dshapedzeta(2)=-0.125*(1+xi)*(1-eta);
dshapedzeta(3)=-0.125*(1+xi)*(1+eta);
dshapedzeta(4)=-0.125*(1-xi)*(1+eta);
dshapedzeta(5)=0.125*(1-xi)*(1-eta);
dshapedzeta(6)=0.125*(1+xi)*(1-eta);
dshapedzeta(7)=0.125*(1+xi)*(1+eta);
dshapedzeta(8)=0.125*(1-xi)*(1+eta);
end

```



```

-----
function
[Ve]=Tinh_Ve(ex,ey,ez,ep,es_e,ungsuat_max,anfa)
    Ve=0;           % T?o giá tr? ban ??u c?a Ve
    nnel=length(ex);
    nog=ep(2)*ep(2)*ep(2); %So dGauss voi tp matrix
    [point,weight]=GaussQuadrature('second');
    for int=1:nog
        rvalue=point(int,1); % toa do x diem Gauss
        svalue=point(int,2); % toa do y diem Gauss
        tvalue=point(int,3); %toa do y diem Gauss
        wt=weight(int);      % tích tr?ng s? cua diem
Gauss                                     t
        [shape,dshapedxi,dshapedeta,dshapedzeta]=Shapefuncti
ons(rvalue,svalue,tvalue;
        %----- ma tran Jacobi tai cac diem Gauss--
        [detJ,~]=Jacobian(nnel,dshapedxi,dshapedeta,dsha
pedzeta,ex,ey,ez);
        %---- Ham khong thu nguyen-----
        Hamtoadokhongthunguyen=shape*es_e';
        Ve=          Ve          +          ((Hamtoadokhongthungu-
yen/ungsuat_max)^anfa)*wt*detJ;
    end

```

Phụ lục 9: Chương trình FEM-Thermalstress-Vibration

```

/pre
L=0.018
D=1E-1
H=6E-3
W=960
V=0.005
SHPP,WARN
/solve
rescontrol,,all,1
ANTYPE,TRANS
TRNOPT,FULL
SSTIF,ON
NLGEOM,ON
OUTRES,ALL,ALL,
TIMINT,OFF
TIMINT,OFF
allsel,all
cmisel,all
CSYS,0
cmisel,s,Facefix
D,ALL,All,0
allsel
*DO,I,1,50
LDREAD,TEMP,,,I*L/(50.0*V),,'F:\rung 65g 1.25von\MECH\file',rth
TIME,I*L/(V*50)
DELTIM, L/(50.0*V), L/(4*50.0*V), L/(50.0*V), 1 !DELTIM, DTIME,
DTMIN, DTMAX, Carry
KBC,0

```

```

SOLVE
*ENDDO
*DO,I,1,20
  LDREAD,TEMP,,,I*L/(20.0*V)+(L/V),,'F:\rung 65g 1.25vong\rung gia
toc truc tiep_files\dp0\SYS\MECH\file',rth
  TIME,I*L/(V*20.0)+L/V
  DELTIM, L/(V*20.0), L/(V*4*20.0), L/(V*20.0), 1
  KBC,0
SOLVE
*ENDDO
*DO,I,1,30
  LDREAD,TEMP,,,I*L/(V*30.0)+2*(L/V),,'F:\rung 65g 1.25vong\rung
gia toc truc tiep_files\dp0\SYS\MECH\file',rth
  TIME,I*L/(V*30.0)+2*L/V
  DELTIM, L/(V*30.0), L/(V*4*30.0), L/(V*30.0), 1
  KBC,0
SOLVE
*ENDDO
*DO,I,1,50
  LDREAD,TEMP,,,I*50*L/(V*50)+3*L/V,,'F:\rung 65g 1.25vong\rung
gia toc truc tiep_files\dp0\SYS\MECH\file',rth
  TIME,I*50*L/(V*50)+3*L/V
  DELTIM, L/(V*50), L/(V*4*50), L/(V*50), 1
  KBC,0
SOLVE
*ENDDO
FINISH
/SOLU
ANTYPE,TRANSIENT,REST
TIMINT,ON

```

```

TIMINT,ON
cmsel,s,Facefix
DDELE,ALL,All
allsel
TIME,54*L/V
DELTIM, L/(V*20), L/(V*4*20), L/(V*20), 1
KBC,0
SOLVE
allsel

```

```

-----
A=57,4 ! bien do
f1=320 ! tan so
tend1=(54*L/V)
phi=0 ! goc pha dao dong
tinc=1/(20*f1)
tend2=tend1+0.5
*SET,_FNCNAME,'Ham_Luc'
*DIM,_FNC_C1,,1
*DIM,_FNC_C2,,1
*DIM,_FNC_C3,,1
*DIM,_FNC_C4,,1
*SET,_FNC_C1(1),A
*SET,_FNC_C2(1),f1
*SET,_FNC_C3(1),tend1
*SET,_FNC_C4(1),phi
*SET,_FNCCSYS,0
*DIM,_%_FNCNAME%,TABLE,6,10,1,,,_%_FNCCSYS%
%_FNCNAME%(0,0,1)= 0.0, -999
%_FNCNAME%(2,0,1)= 0.0
%_FNCNAME%(3,0,1)= %_FNC_C1(1)%

```

```

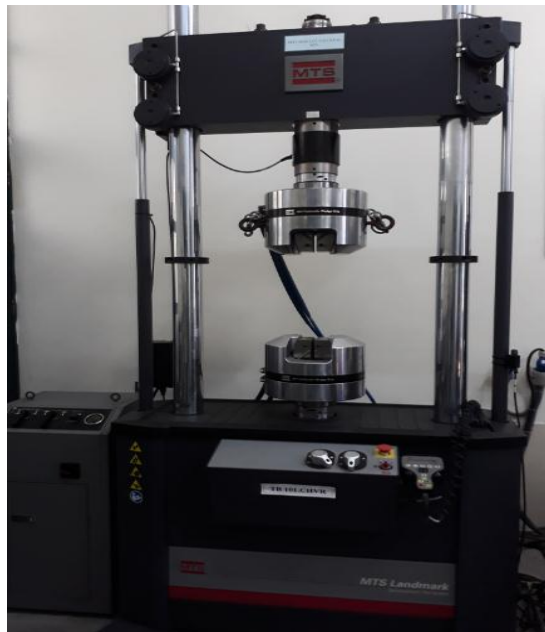
%_FNCNAME%(4,0,1)= %_FNC_C2(1)%
%_FNCNAME%(5,0,1)= %_FNC_C3(1)%
%_FNCNAME%(6,0,1)= %_FNC_C4(1)%
%_FNCNAME%(0,1,1)= 1.0, -1, 0, 2, 0, 0, 0
%_FNCNAME%(0,2,1)= 0.0, -2, 0, 3.14159265358979312, 0, 0, -1
%_FNCNAME%(0,3,1)= 0, -3, 0, 1, -1, 3, -2
%_FNCNAME%(0,4,1)= 0.0, -1, 0, 1, -3, 3, 18
%_FNCNAME%(0,5,1)= 0.0, -2, 0, 1, 1, 2, 19
%_FNCNAME%(0,6,1)= 0.0, -3, 0, 1, -1, 3, -2
%_FNCNAME%(0,7,1)= 0.0, -1, 0, 1, -3, 1, 20
%_FNCNAME%(0,8,1)= 0.0, -1, 9, 1, -1, 0, 0
%_FNCNAME%(0,9,1)= 0.0, -2, 0, 1, 17, 3, -1
%_FNCNAME%(0,10,1)= 0.0, 99, 0, 1, -2, 0, 0
! End of equation: a*sin(2*{PI}*f1*({TIME}-tend1)+phi)
time,tend2
deltim,tinc/2,tinc/2,tinc
kbc,0
!***** Dat gia toc rung***** SOLVE FOR LS 1 OF 1 *****
Acel,0,0,%Ham_Luc% !-- dat ham luc la g
allsel
solve
!-----giai doan chay tu do-----
cmsel,s,Facefix
D,ALL,UZ,0 ! dat chuyen vi tai dau
TIME,tend2+0.3
deltim,tinc,tinc1,tinc*4
allsel
solve
FINISH

```

Phụ lục 10: Các thiết bị đo và thí nghiệm

PL10.1. Thiết bị đo cơ tính MTS-810 Landmark

Máy kéo, nén vạn năng MTS-810 Landmark (Mỹ) để thí nghiệm xác định các tính chất cơ lý của mẫu dùng trong thí nghiệm, hình PL10.1. Đây là các loại máy thí nghiệm sản xuất từ năm 2010. Máy MTS-810 Landmark là hệ thống sinh lực vạn năng hiện đại, máy hoạt động theo nguyên lý kết hợp điện tử - thủy lực, có khả năng thực hiện các thí nghiệm: kéo, nén, uốn, cắt và thử nghiệm từ biến dưới tác dụng của tải tĩnh và động, trong điều kiện nhiệt độ thường hoặc nhiệt độ cao lên đến 1200°C . Tải trọng lớn nhất máy có thể đạt được là 500kN. Quá trình thí nghiệm, đáp ứng biến dạng theo tải trọng được thực hiện thông qua các đầu đo biến dạng (extensometer) kiểu cơ học - điện và bộ xử lý tín hiệu được tích hợp vào máy.



Hình PL10.1: Máy kéo, nén vạn năng MTS-810

Các thông số kỹ thuật của hệ thống sinh lực MTS-810 Landmark cụ thể như sau:

- Tải trọng lớn nhất: 500kN;
- Khoảng cách tối đa giữa 2 đầu kẹp mẫu: 2108mm;

- Độ rộng giữa 2 cột: 762mm;
- Nhiệt độ thử nghiệm lớn nhất: 1200⁰C;
- Kiểu sinh tải: Tĩnh và động;
- Tần số dao động dọc lớn nhất khi tạo tải trọng động: 12Hz.
- Chuẩn đo của extensometer: 10mm, 20mm, 50mm.

Máy được trang bị tại Phòng thí nghiệm bộ môn Cơ học vật rắn- Học viện Kỹ thuật Quân sự.

PL10.2. Thiết bị đo dao động LMS

Để thu nhận và xử lý tín hiệu từ các cảm biến biến dạng và gia tốc, luận án sử dụng hệ thống đo rung, ồn, ứng suất-biến dạng LMS (hãng LMS – Bỉ) và phần mềm chuyên dụng kèm theo máy được trang bị tại phòng thí nghiệm Bộ môn Cơ học máy - Khoa Cơ khí – Học viện KTQS, hình PL10.2. Đây là hệ thống đo, phân tích hiện đại với 16 kênh thu thập dữ liệu, tốc độ lấy mẫu các kênh đo là độc lập và lên đến 1024 kHz, điều này cho phép đo đáp ứng của mẫu khi chịu tải trọng rung xóc ở tần số rất lớn, thiết bị chịu được điều kiện làm việc khắc nghiệt lên đến 55⁰C và rung xóc, cho phép đo thực tế ngoài hiện trường, điều kiện nóng bức.



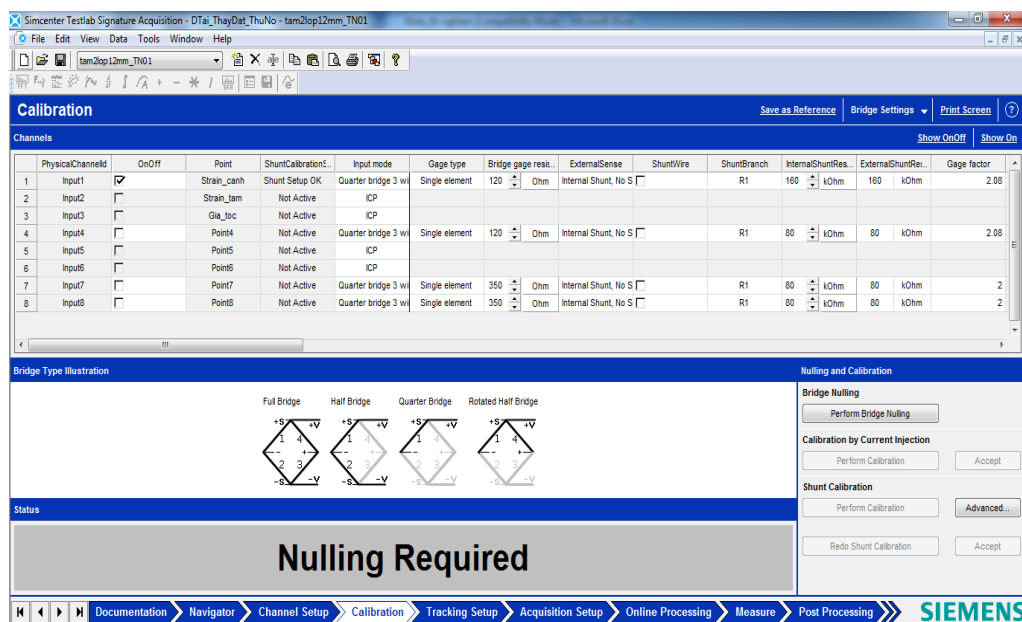
Hình PL10.2: Hệ thống đo rung, ồn, ứng suất-biến dạng LMS

Hệ thống LMS cho phép thực hiện các phép đo và phân tích trong thực tế như sau:

- Đo và phân tích dao động cho các kết cấu như ô tô, tàu hỏa, cầu, các hệ thống máy móc, động cơ...;

- Phân tích modal (phân tích dạng riêng) tìm tần số cộng hưởng, tìm hệ số giảm chấn của kết cấu
- Chẩn đoán tình trạng hỏng hóc của máy, chẩn đoán hộp số, ổ bi...;
- Đo ồn, phân tích âm thanh trong cabin, nhà xưởng...;
- Đo tốc độ lan truyền sóng xung kích;
- Cân bằng máy quay tại hiện trường;
- Đo mô men xoắn trên trục quay;
- Đo ứng suất-biến dạng động của các kết cấu trong quá trình làm việc, làm cơ sở để phân tích, đánh giá tuổi thọ mới và tuổi thọ mới còn lại cũng như độ tin cậy của các kết cấu trong điều kiện làm việc thực tế.
- Đo và phân tích thử nghiệm độ bền của sản phẩm ngoài thực địa.

Hệ thống LMS và phần mềm test Lab kèm theo cho phép ta đo biến dạng với tất cả các kiểu mắc cảm biến biến dạng khác nhau như: cầu hoàn toàn, $\frac{1}{2}$ cầu và $\frac{3}{4}$ cầu, hình PL10.3.



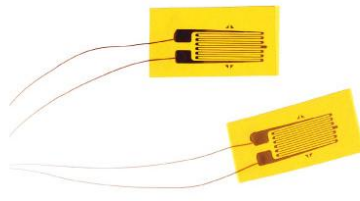
Hình PL10.3: Giao diện phần mềm lựa chọn kiểu mạch cầu để đo biến dạng

PL10.3. Cảm biến gia tốc và tấm điện trở đo biến dạng

- Cảm biến gia tốc dùng trong thí nghiệm là loại ICP-02 (hình PL10.4a), phương pháp định vị: Ren vít M5.
- Tấm điện trở dùng trong thí nghiệm để đo biến dạng là loại HBM của hãng Kyowa (Nhật Bản), có chuẩn đo 2mm (hình PL10.4b).
- Tấm điện trở đo ứng suất dư là loại tem EA-06-062RE-120 của hãng Micro-Measurements (Mỹ), hình PL10.4c.



a) Cảm biến ICP



b) Tem đo biến dạng



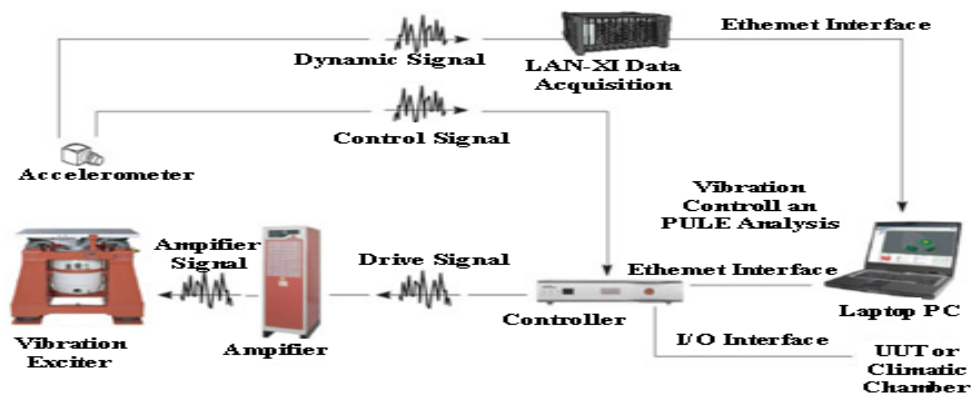
c) Tem đo ứng suất dư

Hình PL10.4: Cảm biến gia tốc, tấm điện trở đo biến dạng

PL10.4. Hệ thống tạo rung động LDS V830-335

Hệ thống thử nghiệm rung xóc LDS V830-335 (hãng Brüel & Kjær – Đan Mạch) hiện được trang bị tại bộ môn Cơ Học Máy- Học viện Kỹ thuật Quân sự là hệ thống thử nghiệm môi trường (với dạng thử nghiệm là rung, xóc) phù hợp với hầu hết các tiêu chuẩn thử nghiệm môi trường như: MIL-STD-883H, MIL-STD-810F; ГOCT 20.57.406-81, IEC 60068-2-6, ASTM, DIM, JIS, ISO... Hệ thống thử nghiệm LDS còn có thể tạo ra môi trường rung, xóc theo dạng tải được đo thực tế ngoài hiện trường. Các thử nghiệm môi trường này (dạng thử nghiệm rung, xóc) nhằm chứng tỏ sự thích ứng của các mẫu (mẫu thí nghiệm, các thiết bị, linh kiện điện- điện tử và các mạch điện tử ...) phải chịu các tải trọng động mà không có sự suy giảm không thể chấp nhận tính toàn vẹn về mặt chức năng và cấu trúc của nó khi chịu các yêu cầu thử nghiệm rung, xóc đã được định trước.

Hệ thống thử nghiệm rung xóc LDS có nguyên lý làm việc kiểu điện động điện từ, với các khối chức năng chính sau: bộ điều khiển tạo tín hiệu rung và thu thập dữ liệu, bộ khuếch đại tín hiệu rung, bàn rung và các cảm biến gia tốc. Sơ đồ các thành phần hệ thống thử nghiệm rung xóc được thể hiện trên hình PL10.5, và hình ảnh hệ thống được trang bị tại bộ môn Cơ học Máy- Học viện Kỹ thuật Quân sự, và được thể hiện trong hình PL10.6.



Hình PL10.5: Sơ đồ các thành phần hệ thống thử nghiệm rung xóc



Hình PL10.6: Hệ thống thử nghiệm rung xóc LDS

Hệ thống LDS có thể thử nghiệm rung xóc cho các kết cấu có khối lượng đến 160 kg, tần số lên đến 3000 Hz và gia tốc tối đa là 75g. Nó cho phép tiến hành các thử nghiệm về khả năng chịu đựng, tuổi thọ của các kết cấu cơ khí

và thiết bị điện, điện tử khi phải làm việc trong môi trường dao động, rung xóc với các dạng tải sau:

- Tải cường bức dạng sin chuẩn;
- Tải cường bức dạng sin quét;
- Tải cường bức dạng mạch động;
- Tải cường bức dạng xung;
- Tải cường bức dạng ngẫu nhiên;

- Tải cường bức dạng bất kỳ được lấy từ phép đo ngoài hiện trường, như tải (gia tốc) do động đất, tải tác động lên khung, giá ô tô, tàu hỏa, tàu thủy... khi làm việc. Hệ thống thử nghiệm rung sóc LDS với phần mềm chuyên dụng đi kèm còn có chức năng quyết tìm tần số dao động riêng của mẫu, theo dõi và duy trì tần số cộng hưởng, đo đặc các hệ số giảm chấn mode của mẫu, theo dõi tải trọng rung, đếm số chu trình hoặc thời gian rung, thiết lập điều kiện dừng thí nghiệm...

PL10.5. Máy xác định ứng suất dư RS200

Chi tiết trước, sau khi rung được đo ứng suất dư theo tiêu chuẩn ASTM E837-01 bằng thiết bị khoan lỗ đo ứng suất dư RS200 [12], hình PL10.7. Trong phương pháp này, người ta gắn lên vị trí cần đo ứng suất dư một cảm biến đo biến dạng đặc biệt (hình PL10.4c) để thu được biến dạng tích thoát theo 3 phương khác nhau khi khoan lỗ, từ đó xác định được ứng suất dư. Cảm biến đo sử dụng trong phép đo này là tem EA-06-062RE-120 đồng bộ với thiết bị và mũi khoan có đường kính 1/16 inch (1,56 mm). Kết quả đo biến dạng và tính toán bằng phần mềm H-drill [12] của hệ thống cho ứng suất ở vị trí chiều sâu 1 mm:

- Ứng suất chính thứ nhất;

- Ứng suất chính thứ hai;
- Góc giữa phương của ứng suất chính thứ nhất và phương của cảm biến.



Hình PL10.7: Máy đo ứng suất dư kiểu khoan lỗ

PL10.6. Thiết bị đo nhiệt OMEGA OS-310-501

Thiết bị đo nhiệt độ từ xa được thể hiện trên hình PL10.8.



Hình PL10.8: Thiết bị đo nhiệt từ xa

Thông số kỹ thuật của thiết bị:

- Dải đo nhiệt độ từ -50°C đến 1650°C
- Trường nhìn: 50:1
- Thời gian đáp ứng: 250 ms
- Hiện thị giá trị: Trung bình, nhỏ nhất, lớn nhất
- Có chỉ thị điểm đo bằng tia laser

Phụ lục 11: Cơ sở xác định ứng suất dư

Giả sử trên một tấm phẳng làm từ vật liệu đồng nhất, đẳng hướng tồn tại ứng suất dư với trạng thái ứng suất phẳng đặc trưng bởi hai ứng suất dư chính $\sigma_{\max}$ và $\sigma_{\min}$ (hình PL11.1). Nếu khoan một lỗ suốt chiều dày vật liệu với đường kính D_0 thì do có lớp vật liệu ở vùng lỗ bị bóc đi nên vật liệu xung quanh lỗ sẽ biến dạng để đạt được trạng thái cân bằng mới, biến dạng này được gọi là biến dạng tích thoát.

Có thể chứng minh được, biến dạng tích thoát đo tại điểm cách tâm lỗ khoan D theo phương hướng kính làm với ứng suất chính lớn nhất một góc β là:

$$\varepsilon_r = (\bar{A} + \bar{B} \cos 2\beta) \sigma_{\max} + (\bar{A} - \bar{B} \cos 2\beta) \sigma_{\min} \quad (11-1)$$

Trong đó:

ε_r - Biến dạng tích thoát đo được bởi cảm biến đo biến dạng hướng kính đặt tại điểm P.

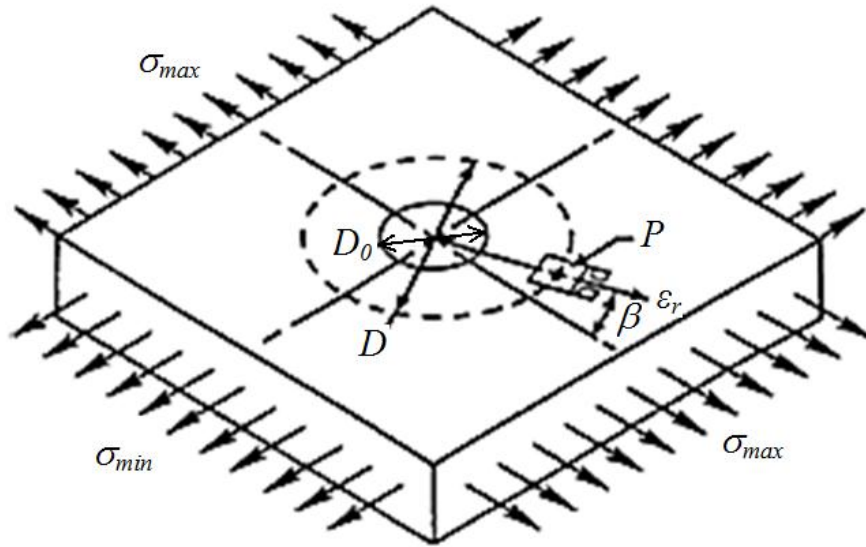
$\sigma_{\max}$ - Ứng suất chính lớn nhất, $\sigma_{\min}$ - ứng suất chính nhỏ nhất ở vùng lỗ trước khi khoan.

β - góc đo theo chiều kim đồng hồ từ phương của đo biến dạng tích thoát đến phương của ứng suất lớn nhất.

D - Khoảng cách theo chiều hướng kính từ điểm đo biến dạng tích thoát đến tâm của lỗ khoan.

D_0 - Đường kính lỗ khoan.

$\bar{A}$, $\bar{B}$ - Hằng số phụ thuộc vào vật liệu và đặc điểm hình học của quá trình khoan.



Hình PL11.1: Sơ đồ ứng suất dư và biến dạng bề mặt tích thoát khi khoan một lỗ trên mẫu vật liệu.

Thực nghiệm cho thấy, các hằng số vật liệu A , B của vật liệu với các tính chất đàn hồi cho trước được xác định nhờ các phương trình dưới đây:

$$\bar{A} = -\bar{a}(1+\nu)/(2E) \quad (11-2)$$

$$\bar{B} = -\bar{b}/(2E) \quad (11-3)$$

trong đó E - Modun đàn hồi và ν - Hệ số Poisson.

$\bar{a}$ và $\bar{b}$ - Các hằng số không thứ nguyên, hầu như không phụ thuộc vào vật liệu, chỉ phụ thuộc vào hình học của mũi khoan (tỉ số độ sâu mũi khoan trên chiều dày vật liệu) và vị trí đo biến dạng tích thoát.

Bằng phương pháp gắn cảm biến đo biến dạng khi khoan lỗ người ta có thể xác định được các biến dạng tích thoát. Trong biểu thức (11-1) có ba giá trị cần xác định: $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$ - độ lớn của các ứng suất chính, β - góc xác định phương của các ứng suất chính. Vì vậy cần xác định biến dạng tích thoát tại ít nhất là ba vị trí khác nhau (tương ứng với các giá trị β khác nhau - song có ràng buộc với nhau). Như vậy thu được hệ ba phương trình ba ẩn đủ để xác định độ lớn và phương của các ứng suất chính.

Trong thực hành, để thuận lợi cho việc xác định các đặc trưng của trạng thái ứng suất: $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$, β người ta thường xác định các biến dạng tích thoát ε_1 , ε_2 , ε_3 tại các vị trí (trên các phương) cách đều nhau (120° , 120° , 120°), hoặc làm với nhau các góc (90° , 135° , 135°). Trong trường hợp thứ nhất: $\beta_2 = \beta_1 + 120^\circ$, $\beta_3 = \beta_1 + 240^\circ$. Trong trường hợp thứ hai: $\beta_2 = \beta_1 + 135^\circ$, $\beta_3 = \beta_1 + 270^\circ$ và khi đó $\cos(2\beta_2) = -\sin(2\beta_1)$, $\cos(2\beta_3) = -\cos(2\beta_1)$. Như vậy bằng cách đo biến dạng trên ba phương làm với nhau các góc (90° , 135° , 135°) ta thu được ba phương trình:

$$\varepsilon_1 = (\bar{A} + \bar{B} \cos 2\beta) \sigma_{\max} + (\bar{A} - \bar{B} \cos 2\beta) \sigma_{\min} \quad (11-4)$$

$$\varepsilon_2 = (\bar{A} - \bar{B} \sin 2\beta) \sigma_{\max} + (\bar{A} + \bar{B} \sin 2\beta) \sigma_{\min} \quad (11-5)$$

$$\varepsilon_3 = (\bar{A} - \bar{B} \cos 2\beta) \sigma_{\max} + (\bar{A} + \bar{B} \cos 2\beta) \sigma_{\min} \quad (11-6)$$

Từ hệ này dễ dàng xác định được $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$ và β .

Phụ lục 12: Tính tuổi thọ của chi tiết mẫu theo các đường cong mỏi

Phương trình đường cong mỏi được viết dưới dạng gọn hơn phương trình (4.4) theo dạng sau:

$$N\sigma^m = C \quad (12.1)$$

trong đó m , C là hệ số đường cong mỏi, N là tuổi thọ của chi tiết khi chi tiết làm việc với mức ứng suất là σ . Tiến hành tính toán mức thay đổi tuổi thọ mỏi cho chi tiết được rung khử so với chi tiết không được rung khử khi làm việc với cùng một mức ứng suất theo các đường cong mỏi như sau:

Đối với đường cong của nhóm chi tiết không rung khử, ta có:

$$N_0\sigma^{m_0} = C_0 \quad (12.2)$$

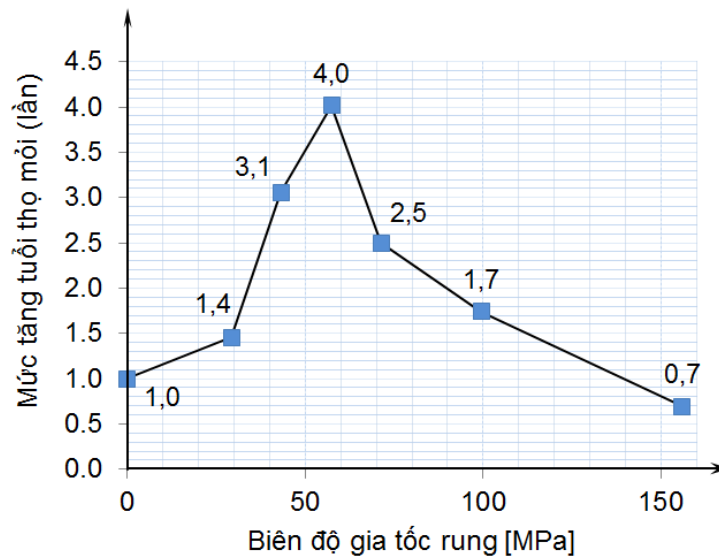
Đối với đường cong của nhóm chi tiết rung khử, ta có:

$$N_1\sigma^{m_1} = C_1 \quad (12.3)$$

Thực hiện lấy tỷ lệ giữa (12.3) cho (12.2), ta thu được giá trị thể hiện mức thay đổi tuổi thọ mỏi của chi tiết sau rung khử ở mức ứng suất σ :

$$\frac{N_1}{N_0} = \frac{C_1}{C_0} \sigma^{m_0 - m_1} \quad (12.4)$$

Lấy mức ứng suất khảo sát là giới hạn chảy của vật liệu (296 MPa). Từ các hệ số đường cong mỏi thực nghiệm thu được, kết quả mức thay đổi giới hạn mỏi theo tính toán được thể hiện trên hình PL12.1.



Hình PL12.1