

3. На основі графічних залежностей встановлено, що завжди існує такий режим довантаження для дволанкової траєкторії навантаження, за якого параметр Q приймає максимальне значення. Отримане при цьому значення кута зламу C може бути використане як рекомендоване в пошуках оптимальних схем термопластичного зміцнення.

1. Тушинский Л.Н. Теория и технология упрочнения металлических сплавов. – Новосибирск: Наука, 1990. – 303 с. 2. Гордиенко Л.К. Субструктурное упрочнение металлов и сплавов. – М.: Наука, 1973. – 223 с. 3. Андрусик Я.Ф. Про критерій нагромадження пластичних деформацій // П'ятий Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Тез. доп. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2001. – С. 132. 4. Андрусик Я.Ф., Ляшенко В.П. Оцінка рівня нагромадження пластичних деформацій зсуву в технологічних процесах зміцнення матеріалів // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2003. – № 483. – С. 3–5. 5. Андрусик Я.Ф., Русинко К.М. Пластическое деформирование упрочняющихся материалов при нагружении в трехмерном подпространстве пятимерного пространства девиаторов // Изв. АН МГТ. – 1993. – № 2. – С. 92–101 6. Андрусик Я.Ф., Ляшенко В.П. Аналітичне дослідження рівня пластичних деформацій зсуву при дволанковій траєкторії навантаження // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2004. – 509. – С. 6–10.

УДК 621.791.947.72.03-621.375.826

В.І. Білобородченко

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра зварювального виробництва, діагностики
і відновлення металоконструкцій

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ЛАЗЕРНОГО МІКРОЗВАРЮВАННЯ ПАКЕТНИХ СТРУМОПРОВОДІВ З АЛЮМІНІЮ

© Білобородченко В.І., 2009

Презентовано результати оптимізації технологічних режимів точкового з перекриттям точок і шовного лазерного мікрозварювання пакетних струмопроводів з алюмінію.

The results of decision of choice of the optimum modes of the laser welding of packages of aluminium current element are represented.

Актуальність дослідження. Пакетні струмопроводи, які складаються з n (10...20 мкм) товщини смуг, де n – кількість одинарних шин в пакеті, є конструктивним елементом потужних емісійних накопичувачів енергії. Основною вимогою до нероз’ємного контактного з’єднання шин є співмірність його гальванічного опору з R_n/n – сумарним опором одинарних шин з алюмінію А1 при забезпеченні надійності за механічною міцністю, щільністю зони з’єднання заданої геометричної форми. З огляду на теплофізичні характеристики алюмінію, металургійні особливості у часі зварювання, особливості формування залишкових полів напружень та деформацій, використання імпульсних потужних поверхневих джерел зварювання є прийнятними для утворення зварної конструкції струмопроводу у вигляді шва з перекривними точками [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Достатністю з рештою рівних умов для формування зварного з’єднання є можливість гнучкого забезпечення порогової щільності потужності поверхневого джерела на рівні $E_n = 10^9...10^{11}$ Вт/м² (залежно від теплоти випаровування, теплопровідності, тривалості нагрівання іншого матеріалу). Для забезпечення якісних показників зварювання технологічні енергетичні показники джерела повинні перевищувати E_n , щоб забезпечити як процеси руйнування структури металу (розплавлення), часткове його

випаровування, так й одночасне зростання частки рідкого металу для формування ванни з регламентованими проплавленнями та залишковим кратером. Застосоване обладнання (установка «КВАНТ-16» з вільною генерацією випромінювання) уможливує режими зварювання з щільністю потужності на рівні $E > 10^9 \dots 10^{10}$ Вт/м² та часом дії $10^{-3} < \tau < 10^{-2}$ с. Такі умови створюються окремими імпульсами тривалістю у межах близько 10^{-2} с. Типові технологічні показники енерговкладення за імпульсного зварювання зумовлені специфікою формування температурних полів у часі зварювання (рис. 1). Для алюмінію розміри зон нагрівання до високих температур незначні, а ізотерми наближені до кола. Крім того, потрібно зауважити, що градієнт коефіцієнта відбиття лазерного променя від поверхні $R < 3 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$.

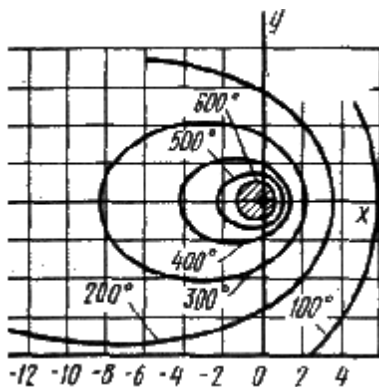


Рис. 1. Ізотерми температурного поля за лазерного зварювання алюмінію

Формулювання мети дослідження. Мета дослідження - оптимізувати технологічні режими точкового з перекриттям точок шовного лазерного мікрозварювання пакетних струмопроводів з алюмінію завтовшки n (10...20 мкм).

Викладення основного матеріалу досліджень. Оцінюючи енергетичну потребу лазерного імпульсного зварювання, використовують такі дані:

1. Час дії імпульсу за експлуатаційними параметрами установки «Квант-16» – 10 мс; еквівалентне приведення до неперервного прямокутного імпульсу постійної потужності: за часом дії $\lambda = 0,55$, за амплітудою енергії потоку $\acute{a} = 0,6$. Або відповідно до $\tau = 5,5$ мс, $W = 13,5$ Дж розплавлення та формування зварної точки відбувається на передньому фронті зростання енергії імпульсу, що залежно від установчих параметрів режиму лежить у межах 1,5–3,3 мс.

2. Прогнозована глибина розповсюдження ізотерми, що відповідає температурі плавлення, становить

$$h = \sqrt{4at} = 0,5 \dots 1,0 \text{ мм}, \quad (1)$$

де температуропровідність $a = 0,850$ см²/с.

3. Теплова стала часу дії імпульсу становить $t = \frac{h^2}{4a} = 0,74$ для технічного алюмінію завтовшки 0,05 см. Тобто для матеріалу з високою температуропровідністю за час дії імпульсу в режими роботи лазера – вільна генерація тепловий потік встигає розповсюдитись на задану глибину.

4. Критична щільність потоку випромінювання, необхідна для досягнення на поверхні матеріалу температури плавлення (660°C), становить

$$E_1 = \frac{0,885 \cdot T_{пл}^0 \cdot I}{\sqrt{at}} = 0,76 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2, \quad (2)$$

де теплопровідність $\lambda = 2,09$ Вт/см⁰С; $a = 0,87$ см²/с; $\tau = 5,5$ мс.

5. Критична щільність потоку випромінювання, за якого забезпечується умова часткового випаровування матеріалу ванни для захисту від атмосферних складових становить

$$E_2 = \frac{0.885 \cdot T_{\text{кип}}^0 \cdot \lambda_m}{\sqrt{a_m \tau}} = 1,96 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2, \quad (3)$$

де температура кипіння $T_{\text{кип}}^0$ за Гульбертом-Хьюї прийнята як врівноважена і становить $941 \text{ }^\circ\text{C}$; відповідно теплопровідність та температуропровідність для таких умов прийняті $1,06 \text{ Вт/см}^\circ\text{C}$ та $0,7 \text{ см}^2/\text{с}$.

6. Критична щільність потоку, за якого виконується умова кінджального прорізання матеріалу з глибоким кратером шва, у якому під час зварювання існує лише парова фаза, становить

$$E_3 = \gamma L_{\text{вип.}} \sqrt{a_l} = 3,4 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2, \quad (4)$$

де $\gamma L = 28,09 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^3$.

7. Енергетична умова лазерного зварювання з мінімальним випаровуванням матеріалу: $E_1 < E_{\text{зв.}} < E_2$ або $E_{\text{зв.}} = 0,76 \dots 1,96 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$. Такий режим, з огляду на теплофізичні характеристики захисних газів (аргон, гелій), рекомендований за лазерного зварювання у контрольованій атмосфері.

8. Енергетична умова лазерного зварювання з використанням як часткового захисту парогазової фази зварюваного матеріалу та гарантованим утворенням залишкового кратера ванни: $E_2 < E_{\text{зв.}} < E_3$ або $E_{\text{зв.}} = 1,96 \cdot 10^5 \dots 3,4 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$. Оскільки застосування статистичних методів та моделювання на їх основі під час аналізу надійності техніки та експериментального оцінювання та контролю надійності є обов'язковим (ДСТУ2861-94, ДСТУ2864-94), тому з метою встановлення області бажаних режимів зварювання використане D-оптимальне планування експерименту на матриці ВВ-3 (Вох-Венкін-3), яке дає змогу у достатньо широкому діапазоні зміни параметрів режиму визначити область їх варіації, достатню та необхідну для задоволення якісних показників зварного шва [2]. Як відгуки (оцінні показники якості шва) прийняті: енергія випромінювання, виділена на поверхні зварної точки $Y(W) \equiv Y1, \text{ Дж}$; діаметр (поверхневий) поодинокі точки $Y(d) \equiv Y2$, у поділках шкали бінокуляра оптичної системи лазера; перекриття одиничних точок під час формування шва $Y(\Delta) \equiv Y3$ з розмірністю коефіцієнта перекриття точок; глибина залишкового кратера (утягнення металу ванни) $Y(h) \equiv Y4$ визначена як проекція тіні верхнього краю зварної точки під час освітлення її освітлювачем під заданим кутом з розмірністю, прийнятою вище. Технологічні параметри: швидкість переміщення виробу $x1$ (мм/с); напруга зарядки ємнісного накопичувача енергії – $x2$ (В); фокусна відстань – $x3$ (мм).

Діапазон зміни параметрів

Параметр	Рівень зміни (код)		
	Нижній	Нульовий	Верхній
X1	0,1 мм/с (-1)	0,3 мм/с (0)	0,5 мм/с(+1)
X2	1600 В (-1)	1650 В (0)	1700 В(+1)
X3	104 мм(-1)	105 мм(0)	106 мм(+1)

Розрахунок поліноміальних моделей проведено машинними засобами. Результати їх перевірки на адекватність та можливість використання для оптимізації технологічних режимів зварювання наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Розрахункові моделі та їх адекватність експериментальним даним

Модель	F_p	F_T
$y1 = 20.53 + 0.637x1 + 2.55x2 + 0.112x3 + 1.43x1x2 - 0.078x2x3 - 3.259x1^2 - 1.635x2^2 - 2.86x3^2$	1,773	3,94
$y2 = 2 - 0.575x1 - 0,25x2 + 1,75x3 - 3,25x1x2 + 0,6x1x3 + 0,25x2x3 + 0,375x1^2 + 0,875x2^2 - 0,625x3^2$	1,29	2,68
$y3 = 85 - 15.63x2 - 7.5x3 - 23.75x2x3 - 10x2^2 - 23.6x3^2$	12,43	2,17
$y4 = 1 - 0.5x1 + 0,125x2 + 1,625x3 + x1x3 + 0,75x2x3 + 1,125x1^2 + 0,375x2^2 - 0,125x3^2$	0,483	3,94

Оскільки модель у3 неадекватно уявляє набір експериментальних даних, зроблено припущення, що такий поліноміальний опис не є реплікою негладкої поверхні відгуку, а розривною (гребеневою) функцією.

Відкидання/підтвердження такої гіпотези проведено гребневим аналізом (рідж-аналіз) моделі за Хьорлом [3].

Процедура методу полягає у знаходженні екстремуму функції $Y(\Delta) \equiv Y3 \equiv Y(x)$ за додаткової умови

$$x'x = r^2, \quad (5)$$

де r – фіксований радіус; $x' = (x_1, x_2, x_3)$ – вектор-рядок значень незалежних (установчих) параметрів процесу зварювання.

З огляду, що поліноміальна модель Y3 описує поверхню другого порядку, її можна подати як

$$y(3) = b_0 + 2b'x + x'Bx \quad B = B', \quad (6)$$

де b_0 – константа моделі ($b_0=85$); $b' = (b_1, \dots, b_k)$ – вектор-рядок коефіцієнтів моделі; $B = (b_{ij})$ – симетрична матриця п-порядку.

Для фіксованого радіуса r рівняння (5,6) сумісні за введення множника Лагранжа, тобто компромісна модель має вигляд

$$y(x\lambda) = b_0 + 2b'x + x'Bx + \lambda(r^2 - x'x). \quad (7)$$

Для стаціонарної точки x_s такої моделі

$$\frac{1}{2} \frac{\partial y}{\partial x'} = b + Bx_s - \lambda x_s = 0 \quad \text{або} \quad (B - \lambda I)x_s = -b, \quad (8)$$

де I – одинична матриця з загальним розв'язком для (8) є сукупністю

$$\begin{cases} x_s(\lambda) = (\lambda I - B)^{-1} b \\ r(\lambda) = \sqrt{x_s' x_s} \end{cases} \quad (9)$$

$$y_s(\lambda) = b_0 + 2b'x_s + x_s' B x_s \quad -\infty \leq \lambda \leq +\infty$$

Числовим розв'язком блока (9) є вираз (10), який є параметричним записом рівнянь гребневих ліній, графічну інтерпретацію $r(\lambda)$ яких показано на рис. 2.

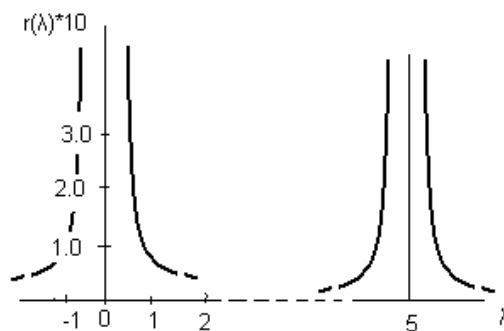


Рис. 2. Функція $r(\lambda)$ гребневого аналізу

$$\begin{cases} y(\lambda) = 70.3 + 2(-7.8, -3.75) \begin{pmatrix} \frac{-7.8}{\lambda+10} \\ -3.75 \\ \frac{-3.75}{\lambda+23.6} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -7.8 \\ \frac{-7.8}{\lambda+10}, \frac{-3.75}{\lambda+23.6} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -10 & 0 \\ 0 & -26.3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{-7.8}{\lambda+10} \\ -3.75 \\ \frac{-3.75}{\lambda+23.6} \end{pmatrix} \\ r(\lambda) = \sqrt{\left(\frac{-7.8}{\lambda+10}\right)^2 + \left(\frac{-3.75}{\lambda+23.6}\right)^2} \\ x_{2_s}(\lambda) = \frac{-7.8}{\lambda+10}, \quad x_{3_s}(\lambda) = \frac{-3.75}{\lambda+23.6} \end{cases} \quad (10)$$

Технологічним висновком рідж-аналізу є необхідність встановлення швидкості переміщення виробу під оптичною віссю лазера, чітко залежною від решти установчих параметрів режиму. Себто оптимізується спочатку напруга зарядки емнісного накопичувача за цієї фокусної відсталі, а далі відповідно до вибраного коефіцієнта перекриття точок виставляється швидкість переміщення.

Встановлення області задавання установчих параметрів режиму та регулювання ними проведене далі числовим аналізом моделей формування зварного з'єднання (табл. 1).

Стационарні точки поверхонь відгуку обраховані як $\frac{dY}{dx^i} = 0$ і з відповідним розв'язком системи лінійних рівнянь становлять:

Модель	Координати точок		
	X1 _s	X2 _s	X3 _s
Y1	0.227	0.783	0.007
Y2	-0.404	-0.416	1.525
Y4	-0.23	-1.18	1.0

Для знаходження екстремумів функціональних залежностей опису процесу зварювання за його показниками якості використано процедуру знаходження других похідних

$\frac{\partial^2 Y_n}{\partial x_i^2} = 0, \frac{\partial^2 Y_n}{\partial x_i \partial x_j} = 0, n = 1...3, i, j = 1...3$ і підстановки їх у повний диференціал кожної з розглянутих функцій:

$$\partial^2 Y_i = b_1^* dx_1^2 + b_2^* dx_2^2 + b_3^* dx_3^2 + b_{12}^* dx_1 dx_2 + b_{13}^* dx_1 dx_3 + b_{23}^* dx_2 dx_3, \quad (11)$$

та складання матриці квадратичної форми і обчислення її головних мінорів, знак яких є показником екстремуму:

$$\begin{vmatrix} b_1^* & b_{12}^* & b_{13}^* \\ b_{21}^* & b_2^* & b_{23}^* \\ b_{31}^* & b_{32}^* & b_3^* \end{vmatrix} \quad (12)$$

Результати обчислень наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Аналіз екстремумів функцій за оцінкою знаків головних мінорів

Модель	Мінор MI	Мінор MII	Мінор MIII	Екстремум
Y1=Y(W)	-0.05	-0.102	-0.06	max
Y2=Y(d)	1.23	1.0	0.927	min
Y3=Y(h)	0.131	0.529	-0.656	екстремум поза областю експерименту

Різноманітність екстремумів поверхонь відгуку опису процесу зварювання по області експерименту не дає змоги установчими параметрами обладнання одночасно задовільнити усі критерії оцінки якості формування зварного шва за умовними екстремумами. Така задача може бути розв'язана процедурою компромісних розв'язків за методом невизначених множників Лагранжа із знаходженням екстремуму нової функції, яка складається з суми основної $y = f(x_1, \dots, x_n)$ та обмежувальних $y_1 = f(x_1 \dots x_n), \dots, y_{lk} = f(x_1 \dots x_n)$, помножених на невизначені множники Лагранжа λ_i . Тоді функція Лагранжа матиме такий вигляд:

$$\Phi = f(x_1 \dots x_n) + \sum_k \lambda f_i(x_1 \dots x_n). \quad (13)$$

Для досліджуваного процесу створені дві функції Лагранжа, в кожній з яких за основну прийнято модель, що описує виділення енергії у зварній точці, а обмежувальними відповідно є моделі розвитку діаметра точки в процесі зварювання та глибина залишкового осаджування металу ванни під час зварювання з паро-газовою фазою.

Отже, ставиться задача забезпечити задані рівні діаметра та кратера осаджування за мінімізації енергії випромінювання з метою підвищення експлуатаційної надійності обладнання з одночасним відтворенням показників якості зварного шва, сформованого з перекривних точок.

Додатковою необхідністю роботи з двома Φ -функціями (13) є встановлення оптимального поля зміни та задавання установчих режимів зварювання, що дає змогу за збереження показників шва проводити компенсацію у певних межах недоліків складально-підготовчих робіт та коливання енергії випромінювання під час зношування елементів квантрона.

З цією метою сформовано підгрупу основних та обмежувальних функцій, для кожної з яких додавалися умови розв'язку на підставі обмеження за стаціонарними точками екстремуму моделей, а саме:

$$\begin{cases} F(W) = Y(W) = Y1, & x2_s = const, \\ F(W) = Y(W) = Y1, & x3_s = const. \\ F(d) = Y(d) = Y2, & x2_s = const, \\ F(d) = Y(d) = Y2, & x3_s = const \\ F(h) = Y(h) = Y4, & x2_s = const \\ F(h) = Y(h) = Y4, & x3_s = const \end{cases} \quad (14)$$

Розв'язком (13, 14) є технологічне рішення на полі установчих та технологічних параметрів зварювання, що наведено у загальних висновках.

Графічну інтерпретацію компромісних рішень показано на рис. 3, а-в (x_1 – швидкість переміщення виробу під оптичною віссю лазера; x_2 – напруга зарядки джерела; x_3 – фокусна відстань).

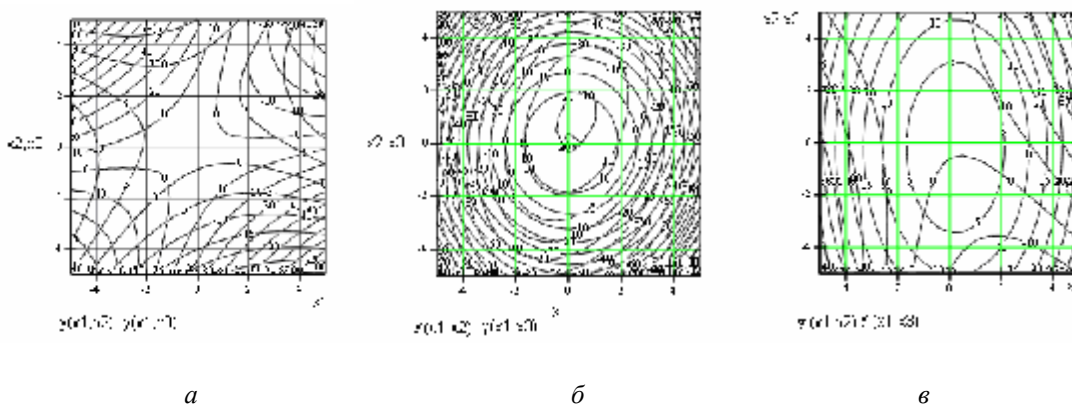


Рис. 3: а – залежність енергії імпульсу W у плямі нагрівання залежно від установчих параметрів лазера.

Суміщені двовимірні перерізи поверхонь відгуку (компромісне рішення для області керування установчими режимами зварювання);

б – залежність формування діаметра плями нагрівання d від установчих параметрів лазера.

Суміщені двовимірні перерізи поверхонь відгуку (компромісне рішення для області керування установчими режимами зварювання);

в – залежність формування глибини кратера зварювальної ванни h_k зварної точки від установчих параметрів лазера. Суміщені двовимірні перерізи поверхонь відгуку (компромісне рішення для області керування установчими режимами зварювання)

Висновки. Керування режимом зварювання лише одним з зазначених установчих параметрів устаткування характеризується значними градієнтами зміни показників якості зварювання (відгуки процесу); однозначно підтверджена необхідність підтримування швидкості переміщення виробу як вільно встановленого параметра, вибір величини якого за коефіцієнтом перекриття визначається лише після задоволення вимог до заданого діаметра зварної точки та залишкового прогину металу ванни шва; мінімаксність двовимірних поверхонь відгуку в області оптимуму не дає змоги на сумішених областях регулювання установчих параметрів режиму отримати якісний показник зварювання лише зміною одного з них за утримання іншого на наперед заданому рівні. Оптимальними значеннями діапазону установчих параметрів лазера та технологічних показників шва, що задовольняють вимогам щодо зварного з'єднання, є: 1. Енергія у плямі нагрівання 19–22 Дж; напруга зарядки ємнісного джерела 1620–1680 В. 2. Фокусна відстань 105–106 мм (оптимальне значення 105,7 мм) – зварювальний режим перефокусування з заглибленням фокусу у метал. 3. Швидкість переміщення виробу $0,2^{+0,1}$ мм/с; діаметр точки $0,5^{+0,15}$ мм. 4. Глибина осадження металу (залишковий кратер) точки $0,1^{+0,1}$ мм. 5. Коефіцієнт перекриття точок 0,2–0,45.

Технологія лазерного шовного мікрозварювання перекривними точками впроваджена на дослідному виробництві «АРСТ-Ukraine», м. Хмельницький.

1. Бадьянов Б.Н., Давыдов В.А. *Сварочные процессы в электронной технике.* – М.: Высш шк., 1988. – 192 с. 2. *Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей: Справочное издание / В.З. Бродский, Л.И. Бродский, Т.И. Голикова и др.* – М.: Металлургия. – 1982. – 752 с. 3. Хартман К., Лецкий Э., Шеффер В. *Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / Пер. с нем.* – М.: Мир, 1977. – 552 с.

УДК 669.14.018.294

І.О. Вакуленко, М.А. Грищенко

Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
кафедра технології матеріалів

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ СТРУКТУРНИХ ЗМІН В МЕТАЛІ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ОСІ ЗА ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

© Вакуленко І.О., Грищенко М.А., 2009

Для залізничної осі наведено закономірні зміни структури металу поверхні руйнування під час випробувань на втомлюваність залежно від стадій зростання тріщини.

The causes of directionality of the change structure plateau cleavage of fatigue and stages growth crack in metal rail axle have been investigated.

Постановка проблеми. Неухильне зростання в останні десятиріччя навантаження на вісь колісної пари разом зі швидкістю руху зумовлює необхідність розроблення пропозицій з підвищення експлуатаційної безпеки залізничного транспорту. Враховуючи, що залізнична вісь є одним із найнавантажених опорних елементів, аналіз розвитку можливих структурних змін в металі осі під час експлуатації є актуальним сьогодні питанням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Характер поведінки металів під час циклічного навантаження залежить від великої кількості чинників [1, 2]. З метою пояснення щодо особливостей розвитку процесів втомлення проводили дослідження структурних змін, визначення характеристики кристалічної будови після навантаження, шукали кореляційний зв'язок з результатами фрактографічного аналізу місць руйнування металу [3].