

Отримано математичні залежності, що описують вплив електричного поля на трибологічні властивості мастильних середовищ та встановлюють взаємозв'язок між основними фізичними параметрами трибосистем і електричним полем. Теоретично обґрунтовано застосування цих залежностей для моделювання процесів, що відбуваються в мастильних середовищах під впливом електричного поля

Ключові слова: мастильні середовища, трибологічні властивості, електричне поле, математичні залежності

Получены математические зависимости, которые описывают влияние электрического поля на трибологические свойства смазывающих сред и устанавливают взаимосвязь между основными физическими параметрами трибосистем и электрическим полем. Теоретически обосновано применение этих зависимостей для моделирования процессов, которые происходят в смазывающих средах под влиянием электрического поля

Ключевые слова: смазывающие среды, трибологические свойства, электрическое поле, математические зависимости

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТОВАННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА МАСТИЛЬНІ СЕРЕДОВИЩА

І. Л. Трофімов

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра екології

Національний авіаційний університет

пр. Космонавта Комарова, 1,

м. Київ, Україна, 03058

Контактний тел.: 097-238-28-89

1. Вступ

Дослідження, про які йдеться у статті відносяться до галузі машинобудування. Скорочення запасів нафти, зріст витрат на її добування та переробку, а також наростаюча шкода від забруднення навколишнього середовища обумовлюють всевітнє скорочення витрат нафтопродуктів. В цей же час у зв'язку з різким подорожчанням природних ресурсів, підвищення експлуатаційних властивостей мастильних середовищ (МС) стає актуальною науково-технічною проблемою. Тому питання щодо підвищення експлуатаційних властивостей робочих рідин, зокрема електричним полем, є одними із складових при розгляді пріоритетних напрямів забезпечення надійності роботи моторної техніки та вузлів тертя.

На сьогодні існують досить високі вимоги до мастильних матеріалів (ММ), режимів і властивостей їх роботи в різних умовах, що визначає необхідність підвищення трибологічних властивостей існуючих матеріалів та необхідність пошуку нових методів створення МС для вузлів тертя машин і механізмів, що є також актуальним.

2. Постановка проблеми. Мета і задачі дослідження

Питання щодо фізики та теоретичного обґрунтування впливу електричного поля на трибологічні властивості робочих рідин на сьогодні залишається відкритим. Мета роботи полягала в отриманні математичних залежностей, що описують

вплив електричного поля на трибологічні властивості МС.

3. Основна частина. Аналіз літературних джерел за темою дослідження

Як відомо, властивості МС нафтового походження забезпечуються характером взаємодії атомів в молекулах і молекул між собою. До складу похідних вуглеводнів - жирних кислот, спиртів, ефірів входить кисень. У МС для поліпшення трибологічних властивостей додають інші хімічні елементи, які при з'єднанні вступають в дію з певними функціональними групами. Комбінацією доданих в МС функціональних груп, які мають різні хімічні елементи, набувають потрібних властивостей робочого середовища, можливість керувати процесами набуття цих властивостей у відповідності з тими функціями, для яких вони призначені [1, 2].

Виходячи з аналізу робіт [1, 2] проведених різними науковими школами з дослідження експлуатаційних властивостей МС можна зробити висновок, що термін їх роботи обмежений з причин старіння в результаті окиснення і спрацьовування присадок.

У роботі [1] показано, що для стабілізації трибологічних властивостей МС електричним полем потрібне порушення або відновлення зв'язків в молекулах МС між окремими функціональними групами. А для впровадження процесу розділення молекули МС на частини необхідне, щоб зовнішня енергія направ-

лена на розрив зв'язків, перевищувала енергію зв'язків молекул.

Як відомо, роз'єднанні кінці в осколках зруйнованої молекули завжди проявлятимуть активність, оскільки вони мають ненасичені енергетичні зв'язки. При першій же нагоді хімічно активні кінці частин молекули насичатимуться, тобто приєднаються до себе подібних, або до ще активніших функціональних груп.

З аналізу праць [1 – 3] видно, що головним компонентом МС, який дозволяє сформувати адсорбційні шари на поверхні металів, є поверхнево-активні речовини (ПАР). Основна властивість ПАР полягає в тому, що центри тяжіння позитивних і негативних зарядів їх молекул не збігаються, і завдяки такій структурі молекула ПАР має постійний дипольний момент. Під час дії на неї електричним полем постійні дипольні моменти мають орієнтуватися за напрямом напруженості електричного поля. За рахунок цього, молекули ПАР повинні переорієнтуватися так, що найменші фізичні елементи об'єму ПАР набудуть дипольні моменти. Така поляризація значно інтенсивніша, ніж поляризація, що індукується електричним полем. Молекули ПАР набувають напрямку за вектором напруженості зовнішнього електричного поля і в міру її зростання дедалі більша кількість цих молекул стає напрямлена за вектором напруженості електричного поля та за певної напруги настає момент, коли майже всі молекули ПАР займають це положення [1, 2]. Це може привести до того, що збільшиться імовірність їх взаємодії між собою, а крім того, упакованість молекул (густина на одиницю довжини поверхні) буде вищою у разі розташування на поверхні металу.

Варто також згадати і про продукти зношування поверхонь тертя. Всі частинки зношування поверхонь тертя належать до провідників. При накладенні електричного поля на МС продукти зношування також опиняються в ньому і за вектором напруженості поля в них перерозподіляються заряди. Позитивні заряди будуть розташовані з одного боку, а негативні – з іншого. Якщо уявити частинку зношування у вигляді кулі, то на її поверхні напруженість локального поля буде більшою порівняно із зовнішнім полем. Під впливом електричного поля навколо продуктів зношування дипольні моменти молекул ПАР набудуть його напрямку, а оскільки частинка зношування – метал, то молекули ПАР адсорбуватимуться на такій поверхні із середовища базового МС.

Таке локальне поле за обсягом впливу перевищує електромагнітне поле звичайного металу, тому на поверхнях таких частинок зносу утворюватиметься полімолекулярний шар молекул ПАР.

Дія електричного поля на базове МС (як приклад, розглянемо оливи). За своїм складом вони належить до неполярного діелектрика. У разі накладення зовнішнього поля на оливи відбувається процес поляризації, оскільки позитивні заряди прагнуть рухатись за напрямком вектора напруженості, а негативні – протилежно. У результаті молекули базової оливи набувають дипольного моменту і мастильне середовище поляризується. Описана фізична картина дії електричного поля на базову оливу не змінює його структури [1, 2]. Його молекули в цьому випадку взаємодіятимуть з вуглеводневим радикалом ПАР і утворять додатково напрямлений шар своїх молекул по вектору напру-

женості. Такий зв'язок може сприяти підвищенню в'язкості ММ. Завдяки дії зовнішнього електричного поля, ММ набувають структури, яка як за рахунок зростання кількості молекул ПАР у вигляді мономерів, так і внаслідок їх взаємодії з молекулами базового середовища має сприяти зростанню в'язкості, що в свою чергу зумовлюватиме зростання товщини змащувального шару.

Такий механізм дає змогу отримати високу локальну концентрацію молекул ПАР прямо на поверхні тертя, що дозволить створити змащувальний шар більшої товщини, а отже, безпосередньо взаємодія виступів поверхонь тертя зменшиться, що призведе до зниження інтенсивності їх зношування. Крім того, частинки зношування, оточені молекулами ПАР, заповнюючи шорсткості поверхонь, знижують питомий контактний тиск між ними, що теж призводить до зниження зносу. При процесах експлуатаційних взаємодій пар тертя слід очікувати адсорбційного пластифікування поверхонь тертя, і, як наслідок, зниження коефіцієнта тертя навіть в умовах граничного змащування.

На основі аналізу літературних джерел встановлено, що основним фізичним параметром, що визначає взаємодію молекул базових МС (олив) та молекул ПАР із електричним полем, є електричний дипольний момент їх атомів і молекул. Використовуючи саме цей фізичний параметр, розглянемо молекулу оливи (або ПАР), на яку впливає електричне поле.

Відомо, що напруженість E електричного поля залежить від напруги U в електричному полі і відстані h , на якій діє ця напруга. У цьому випадку оброблюємо МС електричним полем (метод оброблення та пристрій описані в [4]), подаючи напругу U постійного струму до пристрою підвищення властивостей паливно-мастильних матеріалів. Таким чином,

$$E = \frac{U}{h}. \quad (1)$$

Із термодинаміки відомо [5], що повна енергія системи має вигляд:

$$U' = H - T \frac{dH}{dT}, \quad (2)$$

де H – вільна енергія; $T \frac{dH}{dT}$ – зв'язана енергія.

За літературним джерелом [5] у разі ізотермічної зміни величини поверхні (наприклад рідини) на 1 см^2 затрачується (у разі розтягування) чи віддається (у разі стискування) механічна робота, яка чисельно дорівнює поверхневому натягу σ . Отже, ця робота виражає зміну вільної енергії поверхні при ізотермічному збільшенні або зменшенні поверхні на 1 см^2 . Тобто $H = \sigma$. Згідно з цим рівняння (2) набуде вигляду:

$$U' = \sigma - T \frac{d\sigma}{dT}, \quad (3)$$

де σ – поверхневий натяг, а також вільна енергія одиниці поверхні, erg/cm^2 .

Величина $T \frac{d\sigma}{dT}$ може бути знайденою, якщо відома залежність $\sigma = f(T)$. Ця залежність може бути прийнятою в широкому інтервалі температур [5]:

$$\sigma = \sigma_0 - \beta t, \rightarrow \frac{d\sigma}{dt} = -\beta, \rightarrow U' = \sigma + \beta T. \quad (4)$$

У залежності (4) σ_0 – поверхневий натяг за нульової температури. Отже, з підвищенням температури поверхневий натяг знижується, оскільки збільшується середня відстань між молекулами і їхня міжмолекулярна дія слабшає.

Із рівнянь (3), (4) виходить, що повна енергія поверхневого шару не залежить від температури, оскільки $\frac{d\sigma}{dT} = -\beta$ то $\frac{d^2\sigma}{dT^2} = 0$. З іншого боку, з рівняння (3)

витікає, що $\frac{dU'}{dT} = -T \frac{d^2\sigma}{dT^2}$, отже, $\frac{dU'}{dT} = 0$, що відповідає $U' = \text{const}$.

У розглядуваному випадку можна припустити, що енергія, з якою електричне поле діє на одиничну поверхню ММ, і буде виражати повну енергію U' одиниці поверхні. Тобто:

$$U' = \sigma + \beta T = U. \quad (5)$$

Із формул (1), (4) і (5) можна отримати такі залежності:

$$U = Eh = \sigma + \beta T \rightarrow \sigma = Eh - \beta T. \quad (6)$$

Із формули (6) отримуємо, що поверхневий натяг σ має залежати від напруженості електричного (електростатичного) поля E . Тобто ми отримали залежність $\sigma = f(E)$. Ця залежність експериментально перевірена у праці [6], в якій встановлено, що для авіапалива ТС-1 поверхневий натяг порівняно з вимірами у базовому середовищі та після оброблення електричним полем зменшився у 1,3 разу, для дизельного палива у 1,2 разу. Встановлено, що зі збільшенням напруженості електричного поля, інтенсивніше зменшується значення величини поверхневого натягу авіапалива ТС-1 та дизельного палива.

Розглянемо також поведінку молекул щодо їх динаміки, якщо на мастильні середовища впливає зовнішнє електричне поле. У разі накладення зовнішнього поля (E) постійні диполі молекул як базового середовища, так і ПАР матимуть тенденцію до орієнтації своїх електричних моментів паралельно вектору напруженості поля \vec{E} .

За таких умов підвищується можливість притягування та злипання молекул ММ між собою. Для теоретичного обґрунтування впливу зовнішнього електричного поля на процес переорієнтації осей молекул ПАР буде доцільно використати молекулярно-статистичний підхід.

Допустимо, що в звичайному стані дипольний момент молекули має кут α , тоді енергія диполя буде пов'язана з потенціалом силового поля рівнянням:

$$U = -\vec{P}\vec{E} = -EP\cos\alpha, \quad (7)$$

де $\vec{P} = g\vec{l}$ – електричний дипольний момент молекул; \vec{E} – напруженість електричного поля.

Із залежності (7) видно, що потенціал силового поля залежить від кута напрямку між ним і дипольним моментом та напруженості E . Використовуючи залежності (1), (5) та (7), виведемо таке рівняння потенціалу силового поля, що діє на одиницю поверхні ММ:

$$U = -\vec{E}\vec{P} = (\sigma + \beta T)\cos\alpha. \quad (8)$$

Використовуючи рівняння (8) та враховуючи функцію розподілу молекул ММ за кутом у силовому полі (відому функцію Максвелла – Больцмана), отримаємо:

$$f(\alpha) = e^{-\frac{U}{KT}} \rightarrow f(\alpha) = Ce^{-\frac{(\sigma + \beta T)\cos\alpha}{KT}}, \quad (9)$$

де K – постійна Больцмана; T – температура МС; C – константа.

Константу C знаходимо з умови нормування:

$$2\pi C \int_0^\pi \sin\alpha e^{-\frac{(\sigma + \beta T)\cos\alpha}{KT}} d\alpha = C \frac{2\pi KT}{(\sigma + \beta T)} \left(e^{-\frac{(\sigma + \beta T)}{KT}} - e^{\frac{(\sigma + \beta T)}{KT}} \right) = 1. \quad (10)$$

Функцію розподілу можна записати у вигляді:

$$f(\alpha) = \frac{(\sigma + \beta T)}{4\pi KT} \cdot \frac{e^{-\frac{(\sigma + \beta T)\cos\alpha}{KT}}}{\text{sh}\left(\frac{(\sigma + \beta T)}{KT}\right)}, \quad (11)$$

де $\text{sh}\left(\frac{(\sigma + \beta T)}{KT}\right)$ – гіперболічний синус від аргументу

$$\frac{(\sigma + \beta T)}{KT}.$$

У випадку відсутності зовнішнього електричного поля E ($E \rightarrow 0$), $f(\alpha) \rightarrow \frac{1}{4\pi}$. Важливо при цьому знати,

чи будуть молекули взаємодіяти між собою (злипатись, поєднуватись), чи ні. Для цього введемо імовірність об'єднання молекул $P_{об.}(\alpha)$, причому середнє за кутом α значення імовірності $\bar{P}_{об.}$.

$$\bar{P}_{об.} = 2\pi \int P_{об.}(\alpha) \sin\alpha d\alpha. \quad (12)$$

За аналогією вводим середню імовірність розпаду молекул $\bar{P}_{розп.}$. Тоді процес утворення обох видів молекул ПАР буде описуватись системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{dn_0}{dt} = \bar{P}_{розп.} n_M - \bar{P}_{об.} n_0; \quad (13)$$

$$\frac{dn_M}{dt} = \bar{P}_{об.} n_0 - \bar{P}_{розп.} n_M, \quad (14)$$

де n_0 – кількість однакових молекул; n_M – кількість макромолекул.

Як видно з рівнянь (13, 14), у випадку ($\frac{d}{dt} = 0$) отримуємо:

$$n_M = n_0 \frac{\bar{P}_{об.}}{\bar{P}_{розп.}}. \quad (15)$$

За появи електричного поля можна очікувати збільшення імовірності злипання молекул. Густина розподілу імовірності злипання молекул в залежності від α можна записати у вигляді такого виразу:

$$P_{об.}^E(\alpha) = f(\alpha)W(\alpha), \tag{16}$$

де $W(\alpha)$ – вірогідність злипання (об'єднання) 2-ох молекул під дією поля \vec{E} ; α – кут орієнтації їх осей при зіткненні.

Очевидно, що $W(\alpha)$ є суттєвою лише за малих кутів α . Допустимо, що імовірність злипання молекул підкоряється закономірності

$$W(\alpha) = \frac{1 + \cos \alpha}{2}. \tag{17}$$

Тоді середнє за кутами значення імовірності злипання молекул ПАР (аналогічно базової оливи) $\ddot{P}_{об.}^E$ буде визначатися за залежністю:

$$\begin{aligned} \ddot{P}_{об.}^E &= \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} Ce^{\frac{(\sigma+T)\cos\alpha}{KT}} \sin\alpha W(\alpha) d\alpha = 2\pi \int_0^{\pi} Ce^{\frac{(\sigma+T)\cos\alpha}{KT}} \left(\frac{\sin\alpha}{2} + \frac{\cos\alpha}{2} \sin\alpha \right) d\alpha = \\ &= 2\pi \int_0^{\pi} Ce^{\frac{(\sigma+T)\cos\alpha}{KT}} \frac{\sin\alpha}{2} d\alpha + \pi \int_0^{\pi} Ce^{\frac{(\sigma+T)\cos\alpha}{KT}} \cos\alpha \sin\alpha d\alpha. \end{aligned} \tag{18}$$

Для спрощення виразу введемо заміну змінних $\cos\alpha = t$, $dt = -\sin\alpha d\alpha$ і у цьому випадку отримаємо:

$$\begin{aligned} \ddot{P}_{об.}^E &= \frac{1}{2} + 2\pi \int_1^{-1} Ce^{\frac{(\sigma+T)t}{KT}} \frac{t}{2} (-dt) = \left[\frac{1}{2} + \frac{C}{2} 2\pi \left(\frac{te^{\frac{(\sigma+T)t}{KT}}}{\frac{(\sigma+T)}{KT}} - \frac{e^{\frac{(\sigma+T)t}{KT}}}{\left(\frac{(\sigma+T)}{KT}\right)^2} \right) \right]_{-1}^1 = \\ &= \frac{1}{2} \left[1 + C 2\pi \left(\frac{2\text{ch}\left(-\frac{(\sigma+T)}{KT}\right)}{\frac{(\sigma+T)}{KT}} - \frac{2\text{sh}\left(\frac{(\sigma+T)}{KT}\right)}{\left(\frac{(\sigma+T)}{KT}\right)^2} \right) \right]. \end{aligned} \tag{19}$$

З урахуванням залежностей (17) і (18) підставимо значення константи в рівняння (19) і отримаємо:

$$\begin{aligned} \ddot{P}_{об.}^E &= \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2\pi(\sigma+T)}{4\pi KT \text{sh}\left(\frac{(\sigma+T)}{KT}\right)} \left(\frac{2\text{ch}\left(-\frac{(\sigma+T)}{KT}\right)}{\frac{(\sigma+T)}{KT}} - \frac{2\text{sh}\left(\frac{(\sigma+T)}{KT}\right)}{\left(\frac{(\sigma+T)}{KT}\right)^2} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{\text{ch}\left(-\frac{(\sigma+T)}{KT}\right)}{\text{sh}\left(\frac{(\sigma+T)}{KT}\right)} - \frac{KT}{(\sigma+T)} \right) \right]. \end{aligned} \tag{20}$$

Для розрахунку середнього значення імовірності злипання молекул ПАР (для прикладу як ПАР візьмемо мурашину кислоту) залежно від поверхневого натягу (вільної енергії одиниці поверхні) беремо такі вхідні дані: K – постійна Больцмана, $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$,

Дж/т, або $K = 1,38 \cdot 10^{-16}$, ерг/г; $\sigma_{мур.кис}$ – поверхневий натяг мурашиної кислоти за температури 60°C (табличне значення [5]), становить $33,3 \text{ ерг/см}^2$; T – температура МС, $T = 333\text{K}$; $\beta = 0,152$ (табличне значення для мурашиної кислоти).

Для виконання розрахунків значенням $\sigma_{мур.кис}$ варіюємо в межах $30 - 35 \text{ ерг/см}^2$, оскільки числові значення більші чи менші від інтервалу варіювання, це табличні значення поверхневого натягу вже за інших температур, а ми задали робочою температурою МС – 60°C і ($T = \text{const}$). Виконавши розрахунки за залежністю (20), результати зводимо в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку $\ddot{P}_{об.}^E f(\sigma)$

$\sigma_{мур.кис}$, ерг/см ²	30	31	32	33,3	34	35
$\ddot{P}_{об.}^E$	0,975	0,968	0,956	0,798	0,670	0,550

Таблиця показує, що зі зменшенням поверхневого натягу збільшується імовірність ефекту злипання зорієнтованих у напрямку напруженості електричного поля молекул ПАР. При цьому доцільно також згадати про вплив напруженості зовнішнього поля на дипольні моменти молекул як базового середовища, так і ПАР. Із збільшенням напруженості E молекули мають більш інтенсивно орієнтуватися за напрямком поля.

4. Висновки

Теоретично обґрунтовано вплив електричного поля на трибологічні властивості МС. Міркування про механізм взаємодії молекул МС і їхніх окремих частин під дією електричного поля викладено на підставі проаналізованих робіт й аналізу результатів власних досліджень зміни властивостей робочих рідин під впливом накладених зовнішнього електричного та природного електростатичного полів.

Отримано модельні залежності, що пояснюють взаємозв'язок між основними фізичними параметрами трибосистем і електричним полем:

$$\begin{aligned} \sigma &= f(\vec{E}, \vec{P}, T), \\ P_{об.}^E &= f(E, \sigma). \end{aligned}$$

Література

1. Кравец, И. А. Репаративная регенерация трибо систем [Текст] / И. А. Кравец – Т.: Издательство Бережанского агротехнического института, 2003. – 284 с.

2. Повышение ресурса технических систем путём использования электрических и магнитных полей : монография [Текст] / Е. Е. Александров, И. А. Кравец, Е. П. Лысиков, О. В. Соловьев, А. А. Тропина. – Харьков: НТУ „ХПИ”, 2006. – 544 с.
3. Сканави, Г.И. Физика диэлектриков (Область слабых полей) [Текст] / Г.И. Сканави. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 253 с.
4. Трофімов, І. Л. Метод підвищення експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів дією електростатичного поля [Текст] / І. Л. Трофімов // Вісник Національного технічного університету України „КПІ” (Машинобудування), – 2008. – вип. №53/2008, ч.1 – С. 134–144.
5. Ахматов, А. С. Молекулярная физика граничного трения [Текст] / А. С. Ахматов. – М.: Физ. гиз., 1963. – 472 с.
6. Трофімов, І. Л. Підвищення триботехнічних властивостей палив і олив електричним полем [Текст] / І. Л. Трофімов // Вопросы химии и химической технологи. – №3/2010. – С. 132–137.

Abstract

The article concerns the application of the electric field to ensure the stabilization of operational properties of the lubricating media and presents the results of our research in this area. The main purpose of this research is the theoretical justification of influence of the electric field on the tribological properties of the lubricating media and formation of the mathematical dependences, which describe the influence. The high specifications for the lubricating media define the need to improve the tribological properties of the existing lubricating media, and to find new methods and technologies for production of the lubricating media for machinery. The article justifies the ideas concerning the mechanism of interaction of molecules of the lubricating media and their parts under the influence of external electric and natural electrostatic fields, on the basis of the analyzed works and results of our research. The presented theoretical justification of the influence of the electric field on the working fluids permitted to obtain the mathematical dependences, to analyze and model the influence of the electric field on the tribological properties of the lubricating media, and to obtain the explanation of the relation between the main physical parameters of tribosystems and the electric field. The results of this work can be used to improve the performance properties of the working fluids, in particular anti-wear properties by means of the electric field. The research results can be applied by tribologists, chimnotologists, as well as by specialists in the sphere of operation of fuel and lubricating systems of ground and aviation equipment

Keywords: *lubricating media, tribological properties, electric field, mathematical dependences*

УДК 621.791.052:669.14

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ СИСТЕМЫ Fe-Cr-Ni-Si

С. Н. Попов

Доктор философских наук, профессор
Кафедра "Оборудование и
технология сварочного производства"

Запорожский национальный технический университет
ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063

Контактный тел.: 050-341-72-17

E-mail: spopov@zntu.edu.ua

В роботі розглянуті можливості застосування графоаналітичного методу досліджень для аналізу прогнозування механічних властивостей зварних з'єднань жароміцних сталей системи Fe-Cr-Ni-Si, що був проведений на базі активного експерименту

Ключові слова: *фізико-механічні властивості, зварювальний вузол, оптимізація, деформація, тугоплавкі елементи, поверхня відгуку*

В работе рассмотрены возможности применения графоаналитического метода исследований для анализа прогнозирования механических свойств сварных соединений жаропрочных сталей системы Fe-Cr-Ni-Si проведенного на базе активного эксперимента

Ключевые слова: *физико-механические свойства, сварочный узел, оптимизация, деформация, тугоплавкие элементы, поверхность отклика*