

Машинобудування і зварювальне виробництво

pool, increasing heat input into the pool side edges. This increases electrical resistance, reduces current flow, and creates downward magnetic pressure in the area of the side edges, preventing undercut formation.

A mathematical model of the heat source was developed, representing the composite electrode as a complex heat source. The arc burning in the area of the wire electrode and ensuring complete penetration during single-sided welding is a linear heat source. An arc burning in the straight sections of the strip and melting approximately 30% of the base metal thickness is, according to the dimensionless criteria, a surface heat source of finite width. The composite electrode can be represented as a combination of three heat sources: one linear heat source along the axis and two surface heat sources of finite width at the weld pool side edges.

A method for one-sided high-speed welding has been developed by regulating the energy and magnetic field with a composite electrode consisting of a wire inside a U-shaped strip. The straight sections of the strip are positioned ahead of the wire in the welding direction. The arc increases heat input into the weld pool side edges, preventing undercuts. A rotating arc is formed on the wire and adjacent sections of the curved strip according to the law of least resistance. The arc's travel area increases, and the arc pressure decreases, ensuring high-quality weld formation one-sided flux-bed welding, regardless of the welding gap in the joint and an increase in the welded joints impact toughness by 2–2.5 times.

Keywords: *the one-sided high-speed composite electrode welding, mathematical model of the heat source, undercut, welded joints impact toughness.*

Стаття надійшла 04.03.2026р.

Стаття прийнята 09.03.2026р.

Стаття опублікована 30.04.2026р.

131 – Прикладна механіка

УДК 621.791.052.004.64.

doi.org/10.31498/2522-9990312026359289

Захарова І.В., Спесівцев Я.І

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ТЕПЛОВИЗНИХ ДИЗЕЛІВ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЕННЯ В УМОВАХ ВІДБУДОВИ УКРАЇНИ

Одним із основних напрямів розвитку сучасного тепловозобудування є підвищення рівня форсування теплових дизелів, що дає змогу зменшити їх масу та габарити, а також підвищити економічність за рахунок зростання механічного коефіцієнта корисної дії. У зв'язку з цим дедалі більш актуальним стає питання надійності, оскільки підвищення рівня форсування дизеля об'єктивно призводить до її зниження.

На вітчизняних тепловозах у даний час встановлюються дизелі типу Д49, форсовані за ефективним тиском до рівня близько 2,0 МПа. У високофорсованих дизелях цього типу спостерігається значна теплова напруженість деталей циліндро-поршневої групи, надійність якої значною мірою визначає загальну надійність дизеля.

Зокрема, одними з найменш довговічних і водночас дороговартісних вузлів залишаються кришки циліндрів, основною несправністю яких є тріщини вогневого днища. Їх виникнення зумовлене дією високих температурних градієнтів, циклічних термомеханічних навантажень, концентрацією напружень у зонах клапанів і форсунок, а також процесами термічної втоми та релаксації напружень.

Машинобудування і зварювальне виробництво

У сучасних умовах відновлення України питання підвищення надійності та ресурсу таких вузлів набуває особливої актуальності. Це пов'язано з необхідністю забезпечення безперебійної роботи транспортної інфраструктури, зокрема залізничного транспорту, який відіграє ключову роль у перевезенні вантажів, матеріалів і техніки. Водночас виготовлення нових кришок циліндрів є складним і дорогим процесом, що потребує значних матеріальних і енергетичних ресурсів.

У зв'язку з цим значного практичного значення набуває розробка та впровадження ефективних технологій відновлення деталей, які дозволяють істотно знизити витрати, скоротити терміни ремонту та підвищити експлуатаційний ресурс вузлів.

Доцільним є застосування сучасних методів моделювання напружено-деформованого стану, оптимізація теплових режимів роботи, а також впровадження ефективних технологій відновлення, зокрема наплавлення, електродугового напилення термостійкими матеріалами для ремонту зазначеної конструкції.

Таким чином, підвищення довговічності кришок циліндрів є не лише технічним, а й важливим економічним і стратегічним завданням у контексті відновлення промислового потенціалу України.

Ключові слова: тепловозний дизель, відновлення, електродугове напилення, надійність, ресурс, металізаційне покриття.

Постановка проблеми: Кришка циліндра працює в умовах складного циклічного термомеханічного навантаження, де одночасно діють гістерезисні процеси (циклічна пластичність); релаксація напружень; ефект Баушингера; малоциклова втома. Саме ці процеси визначають довговічність деталі, характер руйнування, необхідність відновлення (зварювання, наплавлення, напилення).

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Встановлено, що основним пошкоджувальним фактором для кришок циліндрів є термічні напруження, тоді як монтажні зусилля та зусилля від тиску газів мають незначний вплив на напружений стан їхніх вогневих днищ [1,3,4].

У високофорсованих дизелях робота матеріалів деталей циліндро-поршневої групи в умовах циклічного навантаження відбувається в реологічних умовах, тобто в умовах:

- циклічного пластичного деформування;
- циклічної релаксації напружень.

Такі умови зумовлені значними тепловими навантаженнями, що виникають у процесі роботи двигуна.

Унаслідок цього в матеріалі відбувається накопичення залишкових напружень, які є основною причиною руйнування деталей циліндро-поршневої групи.

Свою чергою, циклічна зміна напружень і повторювані пластичні деформації призводять до розвитку малоциклової втоми матеріалу, що є характерним механізмом руйнування для теплонапружених елементів, зокрема кришок циліндрів.

Разом з тим встановлено, що у випадку прикладання до конструкції циклічних навантажень, які перевищують межу текучості, але не виходять за межі поверхні текучості, від циклу до циклу внаслідок пластичної деформації відбувається зміцнення матеріалу [4].

У результаті цього процесу матеріал переходить до роботи переважно в області пружних деформацій, тобто відбувається його адаптація до повторних навантажень.

Зміцнення супроводжується зміщенням кривої деформування матеріалу в координатах «напруження–деформація», що приводить до зміни:

- межі текучості;
- межі міцності матеріалу.

Дане явище відоме як ефект Баушингера.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Водночас характер і ступінь цього ефекту значною мірою залежать від передісторії навантаження, а саме:

- амплітуди навантажень;
- їх знакоперемінності;
- рівня пластичних деформацій у початкових циклах.

Графічно процес циклічного деформування описується залежністю «напруження–деформація», яка має вигляд гістерезисної петлі.

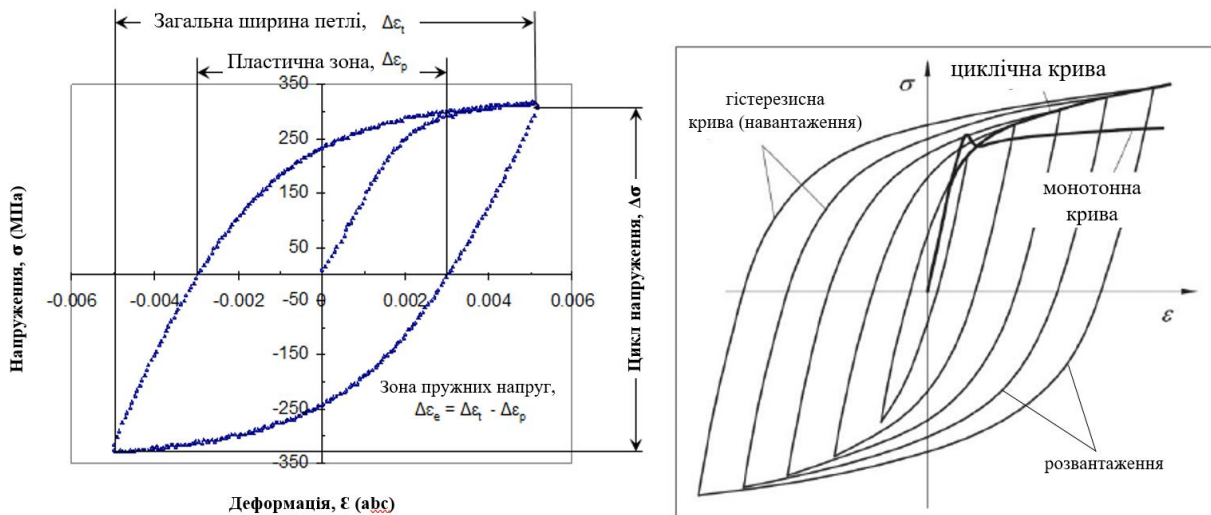


Рисунок – Гістерезисна петля

Гістерезисна петля відображає енергетичні та деформаційні процеси в матеріалі:

- її ширина характеризує величину пластичної деформації;
- площа петлі відповідає енергії, що розсіюється за цикл;
- зміщення петлі свідчить про накопичення залишкових деформацій і напружень.

У процесі багаторазового циклічного навантаження відбуваються такі стадії:

1. Початкова пружно-пластична деформація;
2. Стабілізація циклічного процесу;
3. Накопичення пошкоджень (мікротріщин);
4. Руйнування матеріалу.

Для кришок циліндрів дизелів ці процеси обумовлені періодичними змінами температури та тиску, що призводить до чергування розширення і стискання матеріалу.

Таким чином, основним механізмом руйнування кришок циліндрів є малоциклова термічна втома, яка формується внаслідок:

- високих температурних градієнтів;
- циклічного пластичного деформування;
- накопичення залишкових напружень;
- структурних змін у матеріалі.

Різними авторами досліджувалися окремі фактори, що впливають на інтенсивність процесу релаксації напружень [2,6].

До основних факторів належать:

- тривалість циклу навантаження;
- температура циклу;
- початкове напруження циклу.

Для процесу релаксації напружень характерна наявність двох періодів.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Перший період характеризується різкою зміною напружень, незначною тривалістю. Другий період характеризується відносною сталістю процесу, мінімальною швидкістю релаксації напружень.

При цьому тривалість першого періоду релаксації, порівняно з другим, є дуже малою.

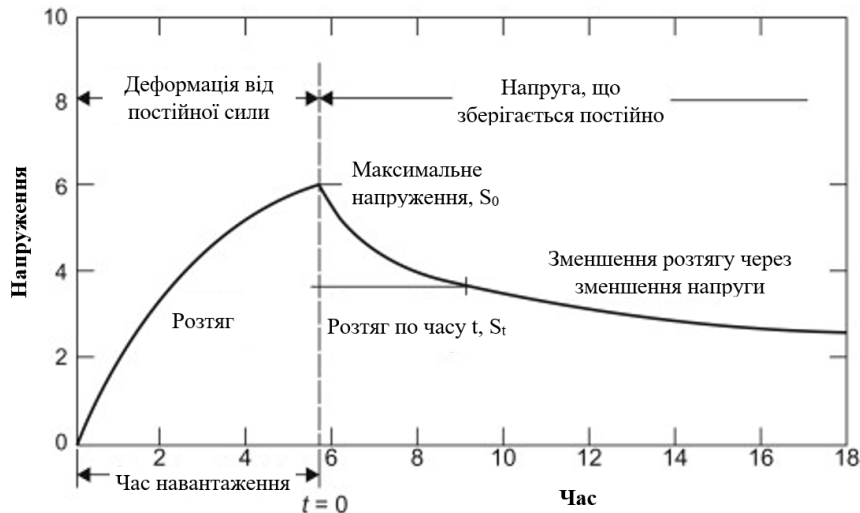


Рисунок 2 – Крива релаксації напружень

Мета дослідження. Метою роботи є обґрунтування способу відновлення (ремонт) та підвищення надійності деталей тепловозних дизелів шляхом удосконалення технологій.

Основний матеріал дослідження При розробці технології відновлення кришок циліндрів дизелів необхідно враховувати, що кожен робочий цикл двигуна супроводжується циклічним термічним навантаженням, яке обумовлює складний напружено-деформований стан матеріалу. У процесі експлуатації в деталях виникають пластичні деформації, відбувається релаксація напружень, а також реалізується повторне навантаження, що має циклічний характер.

Обрана технологія має забезпечити: відновлення міцності, відновлення герметичності, відновлення геометричних розмірів, відновлення посадочних місць, збереження структури матеріалу, мінімізацію залишкових напружень, недопущення нових тріщин після ремонту.

Перспективним напрямом зниження втрат є покращення властивостей поверхні, що контактує із зовнішнім середовищем. Результати наукових досліджень і практичних розробок показують, що це може збільшити строк служби виробів у 2–3 рази.

У цьому напрямі інтенсивно розвивається група методів газотермічного напилення (ГТН) покриттів. До них належать газополуменеве, плазмове, детонаційне напилення, а також електродугова металізація (ЕДМ). При ГТН поверхня деталі, на яку наноситься покриття, залишається у твердому стані. Внаслідок цієї особливості для процесів ГТН характерні малі теплові деформації і, у багатьох випадках, відсутність структурних змін у деталі. Крім того, тут незначні обмеження щодо складу напилюваних матеріалів. Усе це зумовлює привабливість методів ГТН для покращення експлуатаційних характеристик виробів.

Із способів нанесення газотермічних покриттів перспективним є вивчення процесу електродугової металізації (ЕДМ), який виглядає більш доцільним порівняно з іншими способами за тепловою ефективністю, вартістю напилюваних матеріалів та простотою обслуговування. Техніко-економічна оцінка показує, що за відносною вартістю ЕДМ-покриття у 3–10 разів дешевші за покриття, отримані іншими способами газотермічного напилення, при забезпеченні їх високої міцності (рис. 3).

Машинобудування і зварювальне виробництво

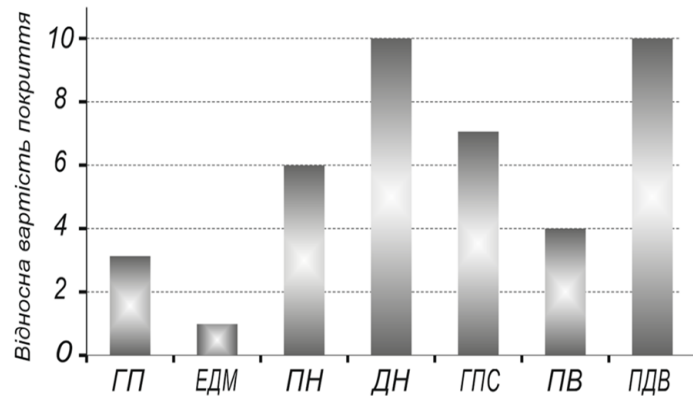


Рисунок 3 – Відносна вартість покриттів, нанесених різними методами напильнення: ДП – газополуменеве напильювання; ЕДМ – електродугова металізація; ПН – полум'яне на відкритому повітрі; ДН – детонаційне напильнення; ГПС – газополуменеве надзвукове; ПВ – полум'яне високошвидкісне; ПДВ – плазмове напильнення в динамічному вакуумі.

При ЕДМ покриття формується з крапель рідкого металу, що рухаються у струмені транспортуючого газу. Нагрівання та плавлення напильюваного металу відбувається за рахунок тепла електричної дуги, яка горить між витратними дротами-електродами, з яких і утворюється напильюваний матеріал. Рідкий метал здувається з торців електродів, подрібнюється під дією газодинамічних та електромагнітних сил і у вигляді крапель рухається у напрямку дії цих сил [7].

Видно, що для ЕДМ характерні риси як газотермічного напильнення (ГТН), так і дугового зварювання. Спільним із ГТН є використання високошвидкісного газового струменя з великою масовою витратою, призначеного для формування та транспортування потоку напильюваних крапель.

В якості ресурсозберігаючих технологій у наш час має місце застосування порошкових дротів, які дозволяють значно розширити діапазон хімічного складу покриттів при дуговому напильненні.

Проведений аналіз дозволив встановити, що для отримання зносостійких покриттів газотермічним напильненням широко використовуються порошки з легованих сталей і сплавів на основі нікелю, кобальту, молібдену і ін., а також композиційні матеріали, що складаються з вищезазначених сталей, карбідів металів, боридів і нітридів (рис.4)[8].

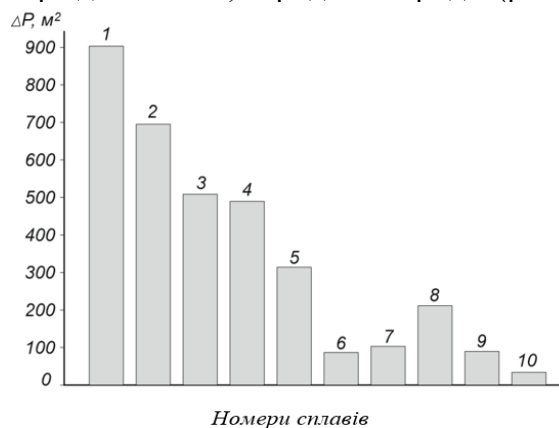


Рисунок 4 – Знос металізаційних покриттів за даними [9]: 1 – низьковуглецева сталь; 2 – корозійностійка сталь типу 18-8 з вмістом молібдену; 3 – хромомолібденова сталь; 4 – стелліт № 66; 5 – стелліт №33; 6 – стелліт №11; 7 – сплав на хромонікелевої основі, 8 – колмоной № 4; 9 – колмоной № 5; 10 – колмоной № 6

Машинобудування і зварювальне виробництво

Для отримання зносостійких покриттів застосовують карбіди кремнію, титану та вольфраму. Найбільш широкого застосування отримав карбід вольфраму. Знаходять застосування матеріали, що забезпечують низький коефіцієнт тертя металевих пар композиції нікель-графіт, керамічні матеріали. Для отримання покриттів із зазначених матеріалів, як правило, застосовують полум'яне або детонаційне напилення. Тому що при дуговому напиленні має місце вигорання багато коштуючих компонентів порошкових дротів під дією кисню розпилювального повітря.

На підставі розрахунків і з урахуванням висловлених передумов була запропонована серія складів порошкових дротів, що містять обґрунтовані вище компоненти і складаються з ферохрому, алюмінієвого порошку, фтористого кальцію, гематиту, залізного порошку (табл. 1.).

Таблиця 1 - Склади порошкових електродів

№ варіантів	Відсотковий склад компонентів				
	залізний порошок	Алюміній <i>Al</i>	<i>Fe Cr</i>	фтористий кальцій	ст. оболонка
1	19	5,0	5,0	1,0	зал.
2	22	8,0	7,0	2,0	зал.
3	20,5	6,5	6,0	1,5	зал.
4	17	3,0	4,0	0,5	зал.
5	23	10,0	8,0	2,5	зал.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто умови експлуатації кришок циліндрів тепловозних дизелів, особливості їх напружено-деформованого стану та фактори, що визначають довговічність і надійність.

Встановлено, що основним чинником пошкодження кришок циліндрів є термічні напруження, які виникають унаслідок високих температурних градієнтів та циклічного характеру навантаження. Показано, що кожен робочий цикл дизеля супроводжується термомеханічними процесами, які включають пластичне деформування, релаксацію напружень і повторне навантаження.

Доведено, що дія циклічних навантажень призводить до накопичення залишкових напружень, структурних змін матеріалу та розвитку малоциклової втоми, яка є основним механізмом руйнування кришок циліндрів. Визначено, що найбільш небезпечними зонами є ділянки біля форсунки та випускного клапана, де спостерігається концентрація напружень і максимальні температури.

Обґрунтовано доцільність застосування сучасних технологій відновлення – електродугової металізації - яка дозволяє підвищити довговічність кришок циліндрів, зменшити витрати на ремонт і забезпечити повторне використання дороговартісних деталей.

Показано, що в умовах відновлення України підвищення надійності та ресурсу деталей тепловозних дизелів має важливе економічне та стратегічне значення, оскільки дозволяє забезпечити стабільну роботу транспортної інфраструктури та знизити залежність від виготовлення нових комплектуючих.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Список використаних джерел

1. Okenyi, V., et al. (2025). Submerged arc welding of S355G10+M steel: Analyzing strength, distortion, residual stresses, and fatigue. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. <https://doi.org/10.1111/ffe.70010>
2. Chen, F., et al. (2025). Assessment of fatigue crack propagation and lifetime considering welding residual stress relaxation. *International Journal of Fatigue*. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2025.107XXXX>
3. Liang, Y., et al. (2025). Influence of welding residual stress on fatigue behavior of titanium alloy. *Crystals*, 15(3), 230. <https://doi.org/10.3390/cryst15030230>
4. Schubnell, J., et al. (2025). Data-driven fatigue assessment of welded steel joints based on transfer learning. *Welding in the World*. <https://doi.org/10.1007/s40194-025-01967-x>
5. Xia, Y., et al. (2023). Re-distribution of welding residual stress in fatigue process of welded joints. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(12), 2378. <https://doi.org/10.3390/jmse11122378>
6. Saputro, M. G., et al. (2024). Residual stress effect on fatigue behavior of welded steel. *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.117>
7. Royanov V., Development of properties of spray flow and nature of pressure distribution in electric arc metallization / V Royanov, I Zakharova E. Lavrova // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* - 8 p. - 6/5 (90) - 2017 - pp. 18-24
8. Похмурский В. И., Студент М. М., Довгуньк В. М. и др. Порошковые проволоки систем FeCrB+Al и FeCrB+Al+C для электродуговой металлизации // *Автоматическая сварка*. - 2002. - № 3. - С. 32-35
9. Борисова А. Л., И. В. Миц, Т. В. Кайда и др. Структура и свойства покрытий на основе феррохрома и феррохромалюминия, полученных элек-тродуговой металлизацией из порошковых проволок // *Автоматическая сварка*. - 1995. - № 6. - С. 3-6.

Zakharova I.V., Spesivtsev Ya.I.

ENHANCING THE RELIABILITY OF LOCOMOTIVE DIESEL ENGINE COMPONENTS THROUGH THE IMPROVEMENT OF RESTORATION TECHNOLOGIES UNDER THE CONDITIONS OF UKRAINE'S RECONSTRUCTION

One of the main directions in the development of modern locomotive engineering is the increase in the boosting level of locomotive diesel engines, which makes it possible to reduce their weight and dimensions, as well as to improve efficiency due to an increase in the mechanical efficiency coefficient. In this regard, the issue of reliability becomes increasingly relevant, since increasing the boosting level of a diesel engine objectively leads to its reduction.

At present, domestic locomotives are equipped with D49-type diesel engines, boosted in terms of effective pressure to a level of about 2.0 MPa. In highly boosted diesel engines of this type, significant thermal stress is observed in the components of the cylinder-piston group, the reliability of which largely determines the overall reliability of the diesel engine.

In particular, cylinder heads remain among the least durable and at the same time the most expensive components, with the main failure mode being cracks in the fire deck. Their occurrence is caused by the action of high temperature gradients, cyclic thermomechanical loads, stress concentration in the areas of valves and the injector, as well as processes of thermal fatigue and stress relaxation.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Under modern conditions of Ukraine's recovery, the issue of increasing the reliability and service life of such components is of particular importance. This is associated with the need to ensure the uninterrupted operation of transport infrastructure, in particular railway transport, which plays a key role in the transportation of goods, materials, and equipment. At the same time, the manufacture of new cylinder heads is a complex and costly process that requires significant material and energy resources.

In this regard, the development and implementation of effective repair technologies for component restoration are of great practical importance, as they allow significant cost reduction, shorter repair times, and increased service life of units.

It is advisable to apply modern methods for modeling the stress-strain state, optimizing thermal operating conditions, as well as implementing effective restoration technologies, in particular cladding, electric arc spraying with heat-resistant materials for repairing the specified structure.

Thus, increasing the durability of cylinder heads is not only a technical issue but also an important economic and strategic task in the context of restoring Ukraine's industrial potential.

Keywords: *locomotive diesel engine, restoration, electric arc spraying, reliability, service life, metallization coating.*

Стаття надійшла 12.03.2026р.

Стаття прийнята 16.03.2026р.

Стаття опублікована 30.04.2026р.

131 – Прикладна механіка

УДК 621.791.753.042

doi.org/10.31498/2522-9990312026359298

Щетиніна В.І., Воленко І.В.

ФРЕТТІНГ-КОРОЗІЯ ОПОРНОГО ВАЛКА І ВТУЛКИ-ЦАПФИ

Природа міжатомних зв'язків електромагнітна. Електрони, що обертаються навколо ядра, створюють мікротоки, напрямок яких в сусідніх атомів однаковий. Мікроструми створюють магнітні поля протилежних напрямків, які взаємно знищуються, поле стає рівним нулю, атоми рухаються в сторону меншого магнітного поля і виникають міжатомні зв'язки, які при зменшенні міжатомної відстані зростають. При протіканні по пластинках постійного струму однакового напрямку, пластини притягуються, що підтверджує електромагнітну природу міжатомних зв'язків. При протіканні по пластинках струмів протилежних напрямків, пластини відштовхуються, що попереджує фреттінг-корозію.

Фреттінг-корозія – процес зварювання контактуючих металевих поверхонь, під дією високих питомих тисків і зсувів, що забезпечує зближення атомів, видалення оксидів, орієнтацію мікрострумів однакового напрямку сусідніх атомів, створення магнітних полів протилежних напрямків, взаємне знищення індукції між атомами, виникнення магнітного тиску тяжіння, скорочення міжатомних відстаней та підвищення міжатомних зв'язків. Для попередження фреттінг-корозії, розроблено спосіб електромагнітної обробки опорного валка і втулки-цапфи, при якому контактуючі поверхні намагнічують, з протилежним напрямком силових ліній магнітного поля, що створює магнітний тиск відштовхування і попереджує фреттінг-корозію. Зі зменшенням відстані між атомами контактуючих поверхонь, під дією високих питомих тисків, під час прокатки металу, індукція зростає та в квадратичній залежності зростає магнітний тиск.