

УДК 621.793.9

DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-112-125

**ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО  
ЕКЗОТЕРМІЧНОГО СИНТЕЗУ МЕТАЛУ В ПРОМИСЛОВІЙ ПРАКТИЦІ  
ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ЦИЛІНДРОВИХ ВТУЛОК ПОРШНЕВИХ ДВИГУНІВ**

**Е.П. Богомолов**

ст. викладач кафедри «Матеріалознавство і технологія матеріалів»  
*boginerged@gmail.com*

**Є.О. Науменко**

к.т.н., доц. кафедри «Матеріалознавство і технологія матеріалів»  
*ORCID ID: 0000-0002-6963-3995*  
*naumenko.e.o@op.edu.ua*

**Є.О. Гаєвський**

ст. викладач кафедри «Матеріалознавство і технологія матеріалів»  
*gaevsk1976@ukr.net*

*Одеський національний морський університет, Одеса, Україна*

**Анотація.** *Наведено технологічні підходи, та параметри процесу наплавлення зносостійкого покриття на внутрішню поверхню циліндрових гільз методом СВС у полі відцентрових сил.*

*Були проведені розрахунки зміни стандартної мольної енергії Гіббса для всіх можливих реакцій між компонентами шихти, щоб визначити, яка з цих реакцій теоретично можуть протікати мимовільно.*

*Для оцінки енергетичного потенціалу шихти також проведено розрахунки теплових ефектів (ентальпій) відповідних реакцій. Досліджено процеси теплообміну між чавунною поверхнею втулки та продуктами екзотермічної реакції при формуванні зносостійкого шару.*

*Методом математичного моделювання за допомогою програмного пакету ELCUT визначено вплив температури продуктів реакції на цілісність обоїми втулки.*

*Розглянуто характерні методи регулювання теплової енергії високо температурного термітного розплаву в залежності від щільності шихтового матеріалу та швидкості обертання.*

**Ключові слова:** *екзотермічна реакція, наплавлення, температурне поле, компоненти шихти, шлакові домішки.*

UDC 621.793.9

DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-112-125

**PROSPECTS FOR THE USE OF HIGH-TEMPERATURE EXOTHERMIC  
METAL SYNTHESIS IN INDUSTRIAL PRACTICE  
FOR THE RESTORATION OF CYLINDER LINERS IN PISTON ENGINES**

**Eduard Bohomolov**

senior lecturer of the Department «Materials Science and Materials Technology»

*boginerged@gmail.com*

**Yevheniia Naumenko**

PhD, Associate Professor of the Department «Materials Science and Materials Technology»

*ORCID ID: 0000-0002-6963-3995*

*naumenko.e.o@op.edu.ua*

**Olersandr Gaievskiy**

senior lecturer of the Department «Materials Science and Materials Technology»

*gaevsk1976@ukr.net*

*Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine*

**Abstract.** *The technological approaches and parameters for the process of depositing a wear-resistant coating on the inner surface of cylinder liners by the SHS method in the field of centrifugal forces are presented. Calculations of the changes in the standard Gibbs free energy for all possible reactions between the charge components were performed to determine which of these reactions can theoretically occur spontaneously. To assess the energy potential of the charge, calculations of the thermal effects (enthalpies) of the corresponding reactions were also conducted. Heat exchange processes between the cast iron surface of the sleeve and the products of the exothermic reaction during the formation of the wear-resistant layer were examined. Using mathematical modeling with the ELCUT software package, the temperature impact of the reaction products on the integrity of the sleeve shell was determined. Characteristic methods for regulating the thermal energy of high-temperature thermite melt depending on the density of the charge material and the rotation speed were reviewed.*

**Keywords:** *exothermic reaction, surfacing, temperature field, charge components, slag impurities.*

Конструкція гільз циліндрів значною мірою визначає наявність тих чи інших дефектів, які формуються під час довготривалого напрацювання. У двигунів з бічним, або верхнім розташуванням клапанів чавунні гільзи циліндрів при надходженні в ремонт мають такі характерні дефекти, як тріщини, наявність геометричної невідповідності працюючих поверхонь до виробничих норм (овальність, бочкоподібність), пробої в стінках циліндрів, натири та затири робочих поверхонь, тріщини в галтелі опорного бурта, кавітаційно-корозійні руйнування зовнішніх поверхонь, що охолоджуються. Причини та фактори, що викликають перелічені

дефекти, а також шляхи підвищення надійності втулок в даний час досить добре вивчені, проте проблема дотепер повністю не вирішена, незважаючи на застосування нових матеріалів для втулок, формування оптимальних параметрів макро- і мікроструктури робочої поверхні, розробку та використання спеціальних моторних мастил з збільшеною температурою згоряння, різних зміцнювальних технологій і т.д. та ін. Низька якість або невідповідність матеріалів, палива та мастила; попадання повітря з високим вмістом абразивних домішок, порушення центрування руху, подачі палива в циліндр з великим вмістом сірки, системи охолодження; корозія; наявність статичної електрики та вібрації.

Досвід експлуатації сучасних суднових двигунів типу S і G MK8 і дизелів останнього покоління показав, що втулки циліндрів перетворилися на одну з головних проблем зниження їх надійності через високі швидкості зношування. Фірма Man Diesel@Turbo пояснює підвищену швидкість зношування втулок «холодною корозією» через переохолодження робочої поверхні втулок у верхній частині та недостатню здатність масляної плівки нейтралізувати сірчану кислоту, що утворюється при згорянні палива.

У разі утворення глибоких тріщин на поверхні циліндра, втулку необхідно замінювати, гільзи циліндрів із тріщинами не відновлюються, незважаючи на те, що робоча поверхня цілком придатна до експлуатації. При відновленні номінальних розмірів втулок двигунів невеликої та середньої потужності їх ремонтують. Технологій ремонту в даний час не багато, за звичай роблять осталівання, або хромування з наступним шліфуванням на номінальний розмір. Деякі фірми відновлюють поверхні циліндрів методом плазмового наплавлення. Зносостійкість втулок циліндрів з плазмовим покриттям приблизно в 1,75 рази вище, ніж серійних. При цьому покриття знижує не тільки величину зносу, але й зменшує нерівномірність зносу по діаметру.

Огляд технологій відновлення гільз циліндрів ДВЗ з великим діаметром від 250 мм. до 900 мм. і більше показав, що на їх хонінгування витрачається дуже багато технологічного часу, а для самих великих діаметрів ці операції можуть виконуватися, тільки у декількох потужних фірм світу. Для реалізації таких складних за технологією робіт потрібно мати відповідне обладнання великих розмірів, яке вкрай енергоємне. Тому для відновлення крупних двигунів з промисловим нанесенням покриття шару зносу, є недосяжним. Але залишаються втулки циліндрів середніх і малих розмірів, вага і геометричні розміри яких, у повній мірі дозволяють виконати роботи по нанесенню відновлюваного покриття новітніми способами з залученням мінімального обсягу енергоємного обладнання. За зразок можна взяти розробки з застосуванням технологій СВС (саморозповсюдженого високотемпературного синтезу) при відновленні пошкодженої поверхні металеві конструкції або механізму. Завдяки явищу відновлення металу з оксидів металів, яке поширюється у практиці будівництва залізничних шляхів з використанням процесів екзотермічних реакцій, можна це явище застосувати і поширити для отримання міцного шару на поверхні виробу при відновленні. Запропонований технологічний засіб по усуненню дефектів циліндрової втулки де наноситься принаймні один шар зносу, який утворює зносостійку робочу поверхню для пор-

шневих кілець при ковзані по стінках гільзи, досягається так само як і при поширених способах. Але завдяки зниженню трудового ресурсу, енергозалежності і матеріального коштовного обладнання, технологія СВС процесів доволі перспективна з урахуванням вище наведених показників. Завдяки використанню **екзотермічного відцентрового способу** усунення дефекту зносу поверхні тертя гільзи, в якості устаткування потрібно мати лише токарний верстат і допоміжне обладнання.

Існує два методи генерації високотемпературного розплаву під час екзотермічної реакції. Перший метод засновано на використанні способу відновлення поверхні зносу плавленням, коли термітну шихту засипають в саму порожнину втулки з дефектом, але потрібно здійснити підігрів за температурою від 200 до 600 °С. Менше нижньої межі – можливо станеться непровар, вище верхньої межі – раннє займання шихти під час насипання в порожнину дефекту, а також зростає ймовірність виникнення пропалу, адже цей спосіб наплавлення підходить тільки для порцій шихти від кількох кілограмів, не більше. Чим більше порція шихти, тим більше і її теплотворна здатність.

Другий метод полягає в отриманні термітного сплаву способом тигельного наплавлення, коли згенерований у тигелі розплавлений метал, вливають в порожнину гільзи що відновлюють. Так само здійснюють підігрів корпусу втулки за температурою від 850 до 900 °С. Високий попередній підігрів тут компенсує втрати тепла, що поглинають стінки тигля, конвекцію та випромінювання, а також на відстань, яку проходить метал від тигля до основного металу. Але наплавлення литтям рідким металом, який утворився в тигелі – реактиві у саму втулку що відновлюється, під час обертання з зменшеною швидкістю, ми розглядати не будемо. Тому що, температура продуктів реакції буде нестабільна в залежності від довжини втулки, що може привести до погіршення формування матеріалу покриття з високотемпературного металу – оксидного розплаву.

Технологія підготовки зношеної поверхні гільзи складається з звичайної механічної обробки: спочатку реакційна поверхня повинна бути розточена на 0,5-1,0 мм на сторону, для усунення нерівностей і забруднень з поверхні металу. Далі – у внутрішню порожнину втулки за методикою ущільнення при обертанні засипається екзотермічна шихта, торці втулки закривають кришками – заглушками з центральним отвором (рис. 1), виготовлених з вогнетривкого матеріалу і проводиться запал.

Отвір в заглушках повинен бути з обох сторін для безпечного виходу продуктів реакції газової фази. Для ініціалізації горіння реакційної суміші безпосередньо в процесі обертання втулки – реактора разом з шихтою, до складу суміші можна ввести запалювальні засоби виготовлені з суміші речовин, що займаються при терті та спресуванні у брикет. Брикет повинен мати форму кулі, багатогранника або кулі із шипами, а запал повинен складатися з речовини або суміші речовин, що легко спалахує при терті. Прикладом може бути суміш, що складається з 25 % бертолетової солі, 50 % перекису марганцю, 15 % сірки і 10 % дрібного алюмінієвого порошку. Горіння суміші починається після початку обертання деталі. Оскільки щільність запалу відрізняється від об'ємної щільності порошкової шихти, швидкість їх переміщень буде різною. Отже, при обертанні відбуватиметься

тертя запалу об оброблювану поверхню деталі та об частинки термітної шихти, що призведе до займання запалу і відповідно до нагрівання екзотермічної суміші до температури її спалаху (1150 К). Далі почнеться екзотермічна реакція, під час якої утвориться рідке залізо, яке відновилося з окислу в суміші з розплавом легуючих присадок і домішок, а також шлаку – окислу металу відновника. Важлива умова, для того щоб ця суміш не розшарувалася під дією відцентрового наплавлення, її компоненти, що мають різну щільність, мають бути змішані, на рідкому склі, а потім висушені і розмелені на гранули діаметром не більше 0,8 мм.



*Рис. 1. Гільза з дефектом та вогнетривка заглушка*

Під дією відцентрової сили розплавлений метал рівномірно розподілиться за оброблюваною поверхнею деталі, а шлак розтікається рівним шаром за поверхнею рідкого металу. Після закінчення екзотермічної реакції деталь продовжують обертати до охолодження та повної кристалізації і формування наплавленого шару, після чого обертання припиняють, заглушки знімають і видаляють шлак, шляхом механічної обробки. При змішуванні з рідким металооксидним розплавом, шлак повинен в ньому добре диспергуватися і потім спливати на поверхню сплаву, що формується. Щоб отримати чисте сплавлення з основним металом, а отриманий шар зносу мав задану хімічну структуру, рідке термітне залізо потребує рафінування спеціальними синтетичними флюсами. Хімічний склад флюсу повинен відповідати марці металевого сплаву, що обробляється. Для чавуну, який застосовується для виливки гільз, рекомендується флюс наступного хімічного складу (масові доли): 28,1 %  $\text{SiO}_2$ ; 4,3 %  $\text{CaO}$ ; 1,1 %  $\text{MnO}$ ; 16,3 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 19,1 %  $\text{NaO}$ ; 2,1 %  $\text{FeO}$ ; 28,3 %  $\text{CaF}_2$ . Але такий флюс спікають у металургійних електропечах при температурі  $t_{\text{пл}} = 1050\text{-}1100$  °С, а потім подають на струю рідкого чавуну, який вливають в форму, що обертається. Флюс до складу екзотермічної суміші містить 12 %

алюмінію (порошок), 8 % силікокальцію, 20 % фракції немагнітного сталюого порошку, 14 % селітри натрію ( $\text{NaNO}_3$ ), 20 % силікат – глиби, 26 % плавикового шпату. Температура спалаху суміші 450 °С, оптимальна кількість 1,5 % від маси термітної шихти. В зв'язку з тим, що натрієва селітра і окалина, а також оксиди заліза ( $\text{FeO}$ ) цілком доступні за ціною, тому прийнятні для використання у складі термітної суміші в якості окиснювачів.

Отриманий за технологією флюс плавиться разом з термітним металом, гільза – реактор при цьому обертається із зниженою швидкістю, щоб активувати рафінування металу від неметалевих включень. Після частоту обертів збільшують до номінальної при якій метал звільняється від часток флюсу разом з шлаком і твердне. Щоб розрахувати відцентрове прискорення ( $a_g$ ) за яким повинна обертатися гільза-реактор разом з високотемпературним розплавом необхідно врахувати коефіцієнт гравітації ( $K_g$ ). Коефіцієнт гравітації визначає кратність перебільшення значень відцентрованих прискорень в заданих точках зразка від обсягів земного тяжіння ( $g$ )

$$K_r = \frac{a_g}{r_g}, \quad (1)$$

де  $r$  – радіус обертання частинки.

Відцентрове прискорення ( $a_g$ ) визначаємо за формулою

$$a_g = 2\pi n^2 d, \quad (2)$$

де  $n$  – частота обертів;

$d$  – внутрішній діаметр втулки.

Після підстановки виразу (2) у вираз (1) отримаємо

$$K_r = \frac{2\pi^2 dn^2}{g} \quad (3)$$

З виразу (3) число обертів  $n$  втулки-реактора в секунду, буде складати

$$n = \sqrt{\frac{g}{2\pi^2}} \times \sqrt{\frac{K_r}{d}} = 0,705 \sqrt{\frac{K_r}{d}}, \quad (4)$$

де  $d$  – діаметр втулки.

Коефіцієнт гравітації  $K_g$  залежить від виду форми і сплаву, що заливається. Для піщаної форми з горизонтальною віссю обертання приймають  $K_g = 75$ , а для металевої форми  $K_g = 80$ , для сплавів з вузьким інтервалом затвердіння  $K_g = 90-100$ .

Необхідно зазначити, що під час формування покриття на внутрішній поверхні втулки-гільзи вплив відцентрових сил різний, залежно від  $\varnothing$  втулки і від товщини шару, що формується. У периферійній зоні, що прилягає до поверхні гільзи, їхній вплив (відповідно, і значення коефіцієнтів гравітації) максимальний. Під час формування шару товщиною 5-7 мм ці значення зменшуються до осі обертання і на внутрішній поверхні можуть зменшитися до 20 %.

Головна особливість процесу формування термітного металу при відцентровому способі наплавлення полягає в тому, що заповнення порожнини форми і затвердіння металотермітного розплаву, що відбуваються в полі дії відцентрових сил, значно перевершують силу тяжіння. Дія поля відцентрових сил, що припадають на одиницю об'єму термітного розплаву, що обертається, може бути виражена залежністю

$$F_g = \frac{\rho \omega^2 r}{g}, \quad (5)$$

де  $\rho$  – щільність розплаву;

$\omega$  – кутова швидкість обертання втулки;

$r$  – радіус обертання довільної точки розплаву;

$g$  – прискорення вільного падіння.

У термітному розплаві, що обертається, утворюється тиск викликаний дією поля відцентрових сил, тиск визначається залежністю

$$P = \left(\frac{\rho \omega^2}{2}\right)(r^2 - r_0^2), \quad (6)$$

де  $r_0$  – радіус вільної поверхні втулки (порожнини).

Згідно до виразу (6) отримаємо: у розплаві, що обертається разом з формою з постійною кутовою швидкістю, додатковий тиск змінюється пропорційно квадрату відстані до розглянутої точки від осі обертання.

Для визначення впливу шлакових домішок на поверхню розплаву під час кристалізації необхідно враховувати сили діючі на сторонні домішки у рідкому металі. Якщо тверда або рідка фракція занурена у розплав та її щільність відрізняється від щільності розплаву, то діяча на фракцію сила з боку розплаву не урівноважується її власною відцентрованою і силою тяжіння. Тому фракції будуть змушені рухатися в ту або іншу сторону залежно від вільної поверхні. Відповідно до закону Архімеда, результуюча сила, діюча на занурену у розплав частинку, що обертається, визначається виразом

$$P_g = V(\rho_\phi - \rho)\omega^2 r, \quad (7)$$

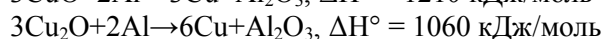
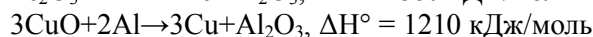
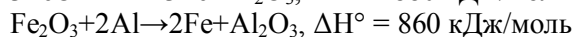
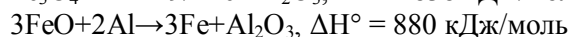
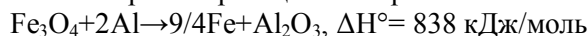
де  $V$  – об'єм фракції;

$\rho_\phi$  – щільність фракції (частинки).

За  $\rho_{\phi} >$  сила позитивна і стороння фракція рухається від осі обертання до стінки втулки, якщо при зворотному співвідношенні щільностей, сила негативна, і стороння частинка рухається до осі обертання і спливає на вільну поверхню розплаву. Дію поля відцентрових сил обов'язково враховують при розробці системи шлакоутворення. З формули (7) виявляється, що сторонні частки (гази, шлак і т. п.), що мають щільність меншу, ніж розплав, під дією сили, обумовленої різницею щільностей і дією поля відцентрових сил, інтенсивно спливають на вільну поверхню розплаву, чим забезпечується отримання якісного малопористого шару наплавленого металу.

Під час підбору складу шихти необхідно виконати термодинамічні розрахунки зміни стандартної мольної енергії Гіббса для всіх можливих реакцій між компонентами. Зміну стандартної мольної енергії реакцій ( $\Delta H^{\circ}$ ) розраховували як різницю між  $\Delta H^{\circ}$  утворення продуктів реакції та утворення вихідних речовин. Розрахунки проводилися з урахуванням молей кожної речовини рівняння реакції.  $\Delta H^{\circ}$  простої речовини дорівнює нулю. Наприклад, для реакції  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\Delta H^{\circ} = -841,7$  кДж/моль. Негативне значення  $\Delta H^{\circ}$  означає, що ця реакція за стандартних умов мимовільно протікає у прямому напрямі. Аналогічним чином з'ясували, що мимоволі в прямому напрямку також протікають реакції взаємодії алюмінію з  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Ca}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ .

Найпоширеніші реакції екзотермічного наплавлення наступні:



Теоретично оцінена максимальна температура реакцій, перерахованих реакцій, становить  $3200^{\circ}\text{C}$  ( $3473\text{K}$ ). На практиці, однак, температура коливається від  $2200^{\circ}\text{C}$  ( $2473\text{K}$ ) до  $2400^{\circ}\text{C}$  ( $2673\text{K}$ ).

Теплові ефекти реакцій утворення оксиду алюмінію в реакційних сумішах на основі різних шихтових матеріалів (див. табл. 1) визначали відповідно до закону Гесса алгебраїчним підсумовуванням зміни тепломісткі при протіканні реакцій утворення оксидів заліза, кремнію, хрому та оксиду алюмінію. Для розрахунку теплового ефекту екзотермічної реакції при наплавленні знаючи, закон Гесса, можна використовувати наступне рівняння:

$$\Delta H = \sum \Delta H_{1n_1} - \sum \Delta H_{2n_2}, \quad (8)$$

де  $\sum \Delta H_{1n_1}$  – сума теплоти утворення продуктів реакції;

$\sum \Delta H_{2n_2}$  – сума теплоти утворення реагентів.

Розрахунки, виконані для екзотермічної суміші з використанням залізного сурика, показують, що кількість тепла, що виділяється на 1 кг маси реакційної



суміші, складе 797 ккал. При цьому, в ідеальному випадку, продукти реакції становитимуть (г) 554  $Al_2O_3$ , 367 Fe та 80 Si.

Утворена в процесі екзотермічної реакції теплова енергія  $Q$  витрачається на нагрів та проплавлення продуктів реакції. Розрахункове значення температури продуктів реакції можна визначати за формулою

$$Q = (C_{Cu}m_{Cu} + C_{Fe}m_{Fe} + C_{Si}m_{Si})t + (\lambda_{Cu}m_{Cu} + \lambda_{Fe}m_{Fe} + \lambda_{Si}m_{Si}). \quad (9)$$

Звідси отримуємо значення температури продуктів реакції

$$t = \frac{Q - (\lambda_{Cu}m_{Cu} + \lambda_{Fe}m_{Fe} + \lambda_{Si}m_{Si})}{(C_{Cu}m_{Cu} + C_{Fe}m_{Fe} + C_{Si}m_{Si})}, \quad (10)$$

де  $\lambda_{Cu}$  – питома теплота плавлення міді (210 кДж/кг);

$\lambda_{Fe}$  – питома теплота плавлення заліза (277 кДж/кг);

$\lambda_{Si}$  – питома теплота плавлення кремнію (164 кДж/кг);

$C_{Cu}$  – середнє значення теплоємності міді (0,385 кал/г · °С);

$C_{Fe}$  – середнє значення теплоємності заліза (0,153 кал/г · °С);

$C_{Si}$  – середнє значення теплоємності кремнію (0,191 кал/г · °С);

$m_{Cu}$  – маса синтезованої міді;

$m_{Fe}$  – маса синтезованого заліза;

$m_{Si}$  – маса синтезованого кремнію.

Важливим фактором для наплавлення шару зносу є вихідна температура продуктів реакції, її необхідно враховувати з метою недопущення проплавлення стінок гільзи. Необхідно розрахувати також співвідношення мас реакційної суміші і чавунної втулки-гільзи з тим, щоб теплова енергія реакції, що передається втулці, не привела до перегріву чавунної обичайки гільзи і її прогоряння. Складність синтезу металу з термітної шихти полягає в тому, що екзотермічна реакція згоряння шихти (суміші) може утворити ударну хвилю розплавленого шлаку (газова фаза) з тиском до 6 атм. при температурі до 3000 °С, і вивести втулку-гільзу з ладу, можливо відбудеться прогоряння. Тому геометрія фронту горіння шихти повинна забезпечити безпеку процесу. Для виконання такого завдання, використовуючи відновлення фторидів металів, кальцієм або іншими відновниками шляхом взаємного погашення спрямованої енергії, можна запобігти виникненню реактивного струменя розплавленого шлаку, перпендикулярного фронту горіння.

За допомогою програмного пакету ELCUT отримано методику моделювання і аналізу, яка може бути дуже корисною для дослідження та оптимізації процесів наплавлення та відновлення пошкоджених поверхонь. Методом регулювання вхідних параметрів, під час експерименту, для моделювання процесів тепло-

вого навантаження можна досягти значень тих параметрів, які б відповідали якісному формуванню наплавленого термітного металу і не руйнували цілісність самої втулки.

Для використання пакету ELCUT, необхідно описати методику моделювання та аналізу, а також надати вхідні параметри по всім компонентам, які беруть участь в нашому експерименті. В програмному пакеті ELCUT є можливість використовувати різні матеріали для моделювання процесу наплавлення, також пакет надає можливість виконувати аналіз напружень та деформації деталі під час процесу наплавлення. Але в нашому випадку достатньо отримати тільки градієнти температурних навантажень на стінки втулки-реактора, щоб спрогнозувати їх цілісність та неушкодженість під час екзотермічного наплавлення. Для цього необхідно підготувати модель геометрії деталі та визначити параметри теплового навантаження, такі як температура та час експозиції.

Для вирішення завдання у блоках побудованої моделі для нестандартної теплопередачі, вводимо параметри втулки (гільзи) і термітної суміші спресованої під час обертання компонентів терміту. Основні параметри це: коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  – (Вт/м·°С); питома теплоємність  $C$  – (кДж/кг·°С); щільність  $\rho$  – (кг/см<sup>3</sup>). Дані беремо з довідника «Структура і властивості металів і сплавів».

Для досконального визначення параметрів теплового впливу на стінки втулки під час екзотермічного синтезу сплаву, такі як швидкість нагріву, температурні навантаження, необхідно визначити фізикомеханічні властивості матеріалу який буде використовуватися для наплавлення. За кожним компонентом моделі так само потрібно врахувати їх технологічні властивості. Властивості застосованих матеріалів приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Дані для розрахунків

№	Технологічні властивості матеріалу	Розмірність	Чавун	Термітна суміш
1	Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda$	Вт/м·К	42,3	89,6
2	Питома теплоємність, $C$	Дж/кг·К	436,3	754
3	Щільність, $\rho$	кг/м <sup>3</sup>	7500	2500

Постановка задачі розподілу температурного поля по стінках гільзи завдовжки 9 мм, виготовленого з легованого хромонікелевого спеціального чавуну під час проходження екзотермічної реакції. Генерація теплового поля в геометрії моделі буде розраховуватися у 184 вузлах сітки в умовах конвективного теплообміну поверхні втулки з високотемпературним розплавом, як бачимо на рис. 2.

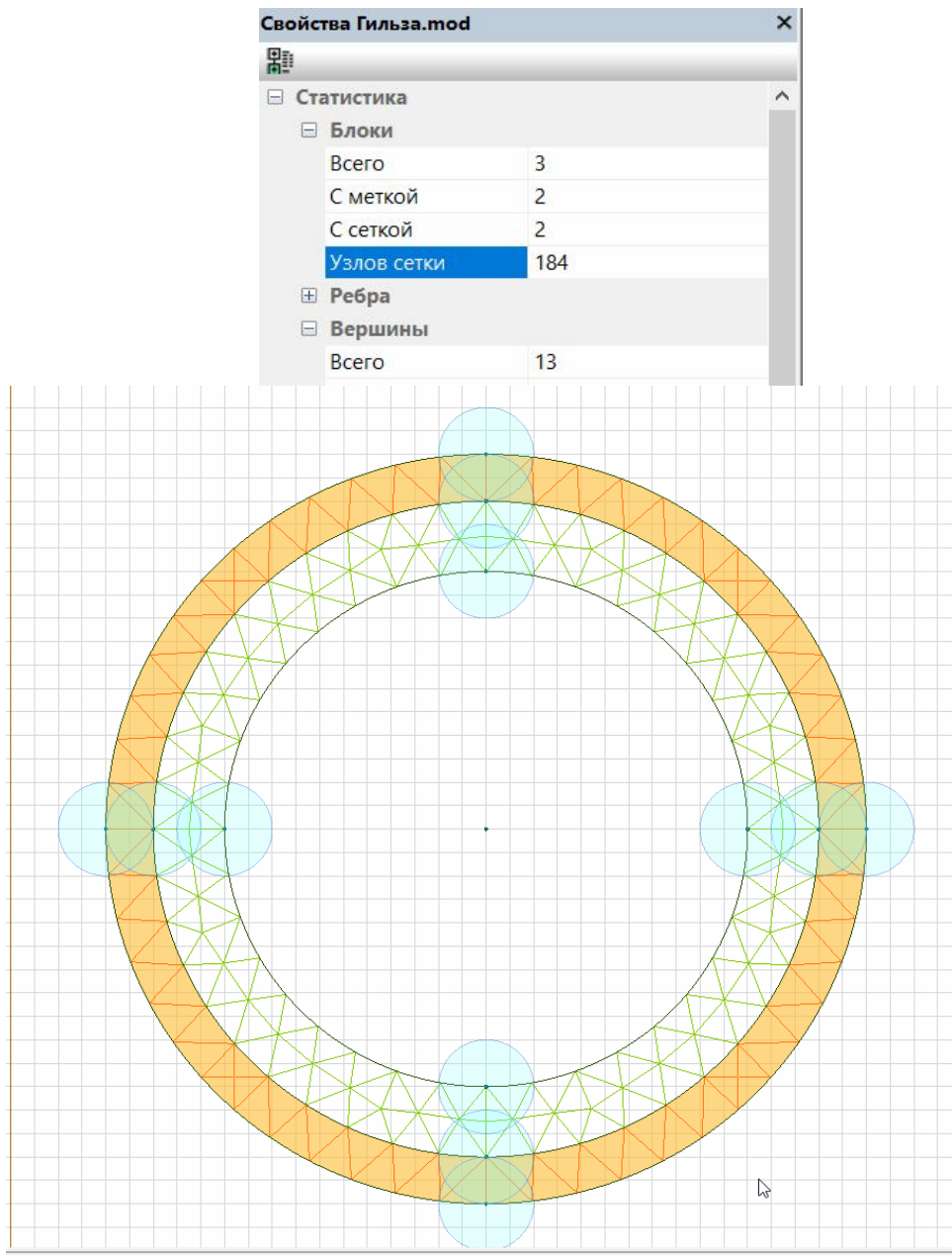


Рис. 2. Геометрія моделі

Провівши розрахунок нестационарної теплопередачі отримали результат, який наглядно демонструє, що реакційне температурне поле не впливає на можливості руйнування (прогорання) стінок гільзи. Температура стінки гільзи ближче до

зовнішньої частини склала лише  $71\text{ }^{\circ}\text{C}$  – синє поле, що вказує на можливість проводити екзотермічне наплавлення втулки гільзи без додаткового технологічного оснащення до захисту від пропалювання (див. рис. 3).

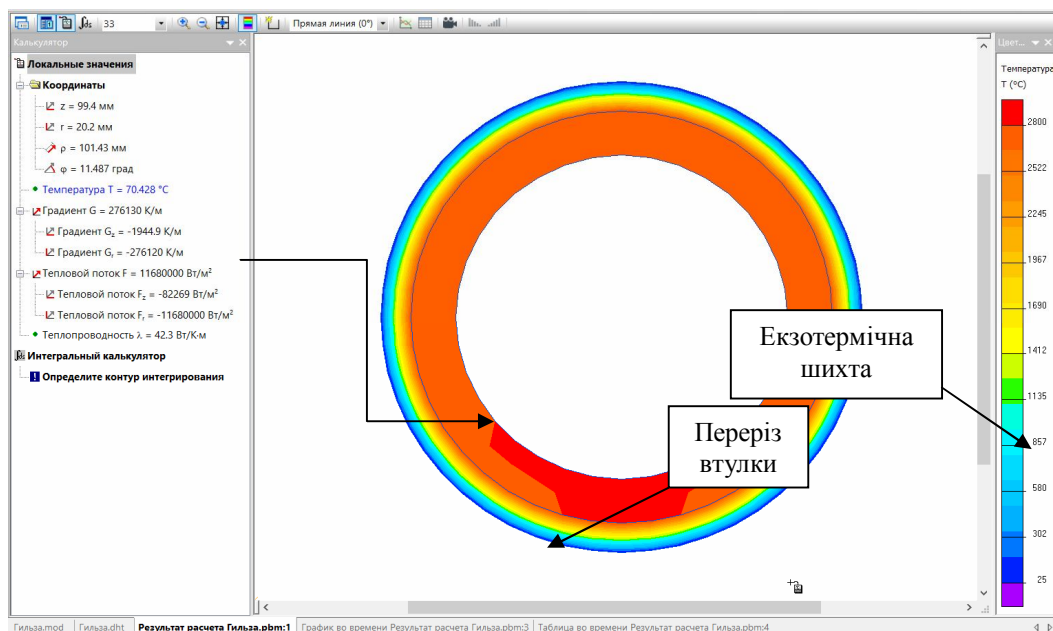


Рис. 3. Поле температурного навантаження під час екзотермічного наплавлення втулки гільзи

У залежності від розмірів втулок і товщини їх стінок для кожної гільзи необхідно буде вводити відповідні параметри в геометрії моделі, щоб прогнозувати вплив температурної енергії реакції на стінки гільзи. В тому випадку, коли температура реакції може утворити руйнування у вигляді прогорання, або деформації, необхідно скерувати фронт температурного навантаження при збереженні якості термітного сплаву. Яким чином можна зменшити температуру продуктів реакції? На практиці у складі термітної шихти використовують окисли з величиною фракції до  $5\text{-}10\text{ }\mu\text{m}$ , і при цьому не має потреби у подібному подрібненні відновника, оскільки збільшується вихід шихти разом з газовою фазою. Тому під час реакції з вмістом у складі шихти хрому з збільшенням щільності від  $1,35\text{ г/см}^3$  до  $1,6\text{ г/см}^3$  швидкість процесу зменшиться з  $73$  до  $27\text{ г/см}^2$  в хв. Уповільнення швидкості з ущільненням компонентів шихти пояснюється збільшенням площі контактів реагентів і теплопровідності шихти. За надмірної щільності складу компонентів теплові втрати реакційної зони зростають настільки, що процес реакції сповільнюється, що призводить до зменшення температурного поля екзотермічної реакції. Якщо усунення дефекту зносу поверхні тертя гільзи здійснюється відцентрованим навантаженням, то результат теплової і кінетичної умови метало-

термічних процесів компонентів суміші, можна регулювати за рахунок збільшення, або зменшення швидкості обертання для досягнення рівномірності розподілу дифузійно-активної речовини на поверхні деталі, що відновлюється.

Для якісного формування метало-оксидного сплаву, що синтезується на внутрішній поверхні втулки, слід враховувати фракційний склад компонентів наповнювача термітної суміші. Найбільший вихід відновленого металу до 53 % від об'єму шихти досягається при використанні компонентів фракцією 0,1-0,315 мм., та щільності суміші близько  $3,5 \text{ г/см}^3$ . Під час насипання термітної суміші у порожнину втулки-реактора, значення насипної щільності буде складати 2-2,5  $\text{г/см}^3$ . Після збільшення швидкості обертання втулки разом з шихтою до розрахункової швидкості 800-900 об/хв. під впливом відцентрової сили щільність збільшиться до  $3,35 \text{ г/см}^3$ , таке значення є оптимальним, за яким пористість отриманого шару термітної шихти для генерації оксидного металу не перевищує нормативних норм в межах допуску на лиття.

**Висновки.** Таким чином наплавлення технологією СВС з використанням **екзотермічного відцентрового способу** усунення дефектів поверхні тертя чавунних гільз, забезпечує достатню міцність утвореного термітного металу і металу зони термічного впливу деталі. При цьому високотемпературна технологія екзотермічного наплавлення забезпечує міцність шару зносу більшу ніж у материнського сплаву. На підвищення межі міцності впливають два фактори. Перший полягає в термодинамічному процесі протікання екзотермічної реакції, за якою відбувається відносно повільне охолодження під товстим шаром шлаку на поверхні, яке сприяє утворенню феритно-цементитної структури, що володіє більшою твердістю і міцністю. Другий фактор пов'язаний з наявністю великої кількості алюмінію в наплавленому металі в вигляді інтерметалевих вкраплень типу  $\text{Fe}_n\text{Al}_m$ , мікротвердість яких в два рази більша ніж мікротвердість феритної основи 947,8-1030  $\text{кгс/мм}^2$  проти 412-458  $\text{кгс/мм}^2$ .

Провівши математичне модулювання розповсюдження високотемпературного навантаження на стінки гільзи товщиною 9 мм виявили, що реалізація робіт по відцентрованому наплавленню може проводитися без застосування додаткового обладнання до захисту і охолодженню зовнішньої поверхні втулки. Вплив температурного поля реагентів розчину близького до 3273 К не спричинить руйнації в вигляді прогорання, а показники межі твердості зразків, взяті із металу наплавленого комплексною екзотермічною сумішшю, рівні або незначно перевищують показники основного металу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кувшинова Н.Н. Энергосберегающая технология наплавки стальных деталей // Сварочное производство. 2010. № 1. – С. 12-14.
2. Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов // Машиностроение – 1. – 2007. – 568 с.

3. Лебедев В.Г., Лебедев Б.В. Технологические экзотермические смеси и их необходимые энергетические характеристики. Труды Одесского политехнического университета. Одесса, 1998. Вып. 1
4. Шинский О.И., Бабич Н.В., Буровский Н.И. Определение технологических параметров процесса нанесения защитного корундового покрытия на элементы стальных трубопроводов // МЕТАЛЛ И ЛИТЬЕ УКРАИНЫ. № 3 (214). 2011. С. 18-22.
5. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: теория и практика / Под ред. А.Е. Сычева. Черноголовка: Территория, 2001. 432 с.
6. Яценко В.В., Амосов А.П., Самборук А.Р. Термодинамические исследования горения железо-алюминиевого термита // Серия «Физико-математические науки», 2011, выпуск 2 (23). С. 123-128.
7. Мровец Вербер. Современные жаропрочные сплавы // К.: Металлургия, 2012. – 184 с.
8. Структура і властивості металів і сплавів. Довідник. Л.Н. Ларіков, Ю.Ф. Юрченко. – К., Наукова думка. 1985. 439 с.
9. Богомолов Е.П., Смажило Б.В., Опарін А.В. Розвиток практичного застосування термодинамічного синтезу, що самопоширюється, при відновленні зношених механізмів // Вісник ОНМУ. Зб. наук. праць, випуск 4 (71). 2023. С. 124-139.

*Стаття надійшла до редакції 22.04.2024*

**Посилання на статтю: Богомолов Е.П., Науменко Є.О., Гаєвський Є.О.**

Перспективи використання високотемпературного екзотермічного синтезу металу в промисловій практиці при відновленні циліндрових втулок поршневих двигунів // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2024. № 2 (73). С. 112-125. DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-112-125.

*Article received 22.04.2024*

**Reference a journal artic: Bohomolov E, Naumenko Y., Gaievskiy O.**

Prospects for the use of high-temperature exothermic metal synthesis in industrial practice for the restoration of cylinder liners in piston engines // Herald of the Odesa national maritime university: Coll. scient. works, 2024. № 2 (73). P. 112-125. DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-112-125.