

Дорошенко В.С., Клименко С.І.
(ФТІМС НАН України, Київ)

**ПРО ОПТИМАЛЬНИЙ ВИБІР ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ
 АВТОПРОМИСЛОВОСТІ З УРАХУВАННЯМ ВТІЛЕНОЇ ЕНЕРГІЇ**

E-mail: doro55v@gmail.com

Втілена енергія – це розрахунок усієї енергії, яка використовується для виробництва матеріалу чи продукту, включаючи видобуток, виробництво та транспорт. Досліджуючи тему втіленої енергії, в роботі [1] порівняно значення цієї енергії для окремих конструкційних матеріалів (табл. 1). З урахуванням того, що товари складаються з праці людей, матеріалів та енергії; в свою чергу, праця включає енергію та матеріали; матеріали включають працю та енергію, а енергія включає працю і матеріали, робиться висновок, що вартість товарів становить приблизно 25 % праці, 25 % матеріалів і 50 % енергії.

Таблиця 1 – Втілена енергія для деяких матеріалів

Матеріал (з урахуванням способу виробництва)	Втілена енергія МДж/кг
Титан	920
Алюмінієвий лист (первинний, в середньому)	255
Мідь (в середньому)	151
Структурні полімери (первинні, в середньому)	84
Магній (в середньому)	80
Нержавіюча сталь	79
Литий алюміній (первинний, в середньому)	58
Звичайна вуглецева та низьколегована сталь (в середньому)	51
Структурні полімери (вторинні, в середньому)	42
Скло (основне, в середньому)	30
Аустемперований високоміцний чавун (ADI) (в середньому)	30
Високоміцн. чавун / чавун з компакт. графітом (в середньому)	26
Литий алюміній (вторинний, в середньому)	23
Сірий чавун (в середньому)	23

Лиття металу – це найбільш економний енергетичний шлях від металевих руд

до металевому продукту [1]. Вартість вхідних матеріалів для лиття металів пропорційна їх втіленій енергії. Первинний алюміній включає велику кількість енергії від перетворення бокситової руди на метал. Низька вартість вторинного алюмінію відображає низьку кількість енергії для повторного його плавлення.

Значне нарощування випуску електричних транспортних засобів змінює завантаження ливарного виробництва, а електромобіль має особливості щодо втіленої енергії. Приблизно половина ливарної продукції, яка нині використовується для автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ), не потрібна для виробництві електромобілів [1, 2]. Щоб ливарникам зберегти свої позиції на ринку, їм слід впроваджувати інновації або вони збанкрутують.

Позитивні якості електромобілів у тому, що вони не мають викидів вихлопних газів, а ефективність електродвигуна складає близько 80 %. Проте вони важать у середньому на 500 кг більше, ніж аналогічні автомобілі з ДВЗ – це негатив. Електромобілі коштують дорожче, ніж подібні засоби з ДВЗ, бо вони містять додаткову енергію вартістю приблизно 10 000 дол. США, втілену в акумуляторній батареї. Це важливо, адже уряди ряду країн надають податкові кредити – до 7000 дол. США, штучно стимулюючи продажі електромобілів, компенсуючи вартість втіленої енергії, за яку покупець сплачує наперед [1].

У типового сучасного автомобіля з ДВЗ силовий агрегат має ефективність 40 %. При спалюванні вуглецевого палива (бензин/дизельне паливо) 40 % енергії витрачається на роботу автомобіля. Електромобіль використовує електроенергію від енергетичної компанії. Припустімо, що ця компанія виробляє енергію з ефективністю 60 % витрат природного газу. Електростанція на природному газі 60 % енергії перетворює на електрику, 5 % втрачається при передачі на зарядний пристрій кінцевого користувача та в транспортний засіб. Тоді електродвигуни з ефективністю 80 % передають потужність на дорогу з загальною ефективністю електромобіля $60 \% \times 95 \% \times 80 \% = 46 (\%)$ [1].

Ефективність 46 % електромобіля краща, ніж 40 % у автомобіля з ДВЗ, але пам'ятаємо, що з електромобілем купується енергія на 10 000 доларів США (можливо, 100 000 кВт.год) наперед, втілена у виробництві автомобіля, і він важить

на 500 кг більше, ніж аналогічне авто з ДВЗ, яке потребує, можливо, на 10 % більше потужності, ніж для приведення до руху електромобіля. Отже, чи є електромобіль більш ефективним, ніж порівнянний автомобіль з ДВЗ? Чи виробляє він менше CO₂ протягом своєї експлуатації [1]?

Перехід на електротранспорт мотивується досягненням нульового викиду вуглецю, але жоден електромобіль не матиме нульових викидів вуглецю, враховуючи походження електроенергії. А тип двигуна слід вибирати не за альтернативою: «вуглецевий чи безвуглецевий», а за показниками найбільшої ефективності. Зокрема, компанія General Motors (GM) поставила корпоративну мету «нуль викидів, нуль заторів, нуль аварій» [1], поставивши своїх клієнтів перед рішенням – нуль вуглецю або нічого. GM наразі продає електричний Hummer масою 4 500 кг, а електромобіль Chevrolet Bolt EV з найнижчою ціною в США за 26 500 дол. США – невеликий седан масою 1640 кг. І навпаки, компанія Toyota вибрала інший шлях, в 2022 р. її гендиректор Акіо Тойода сказав, що їхня мета «залишається незмінною, задовольнити якомога ширше коло клієнтів якомога ширшим асортиментом силових агрегатів» [1].

Електродвигуни мають значний крутний момент, не потребують заміни масла, зменшують смог у центрі міст. Деяким людям вони ідеально підходять, але не всім. Металообробна промисловість змогла розробити та виготовити сучасне покоління високоякісних, ефективних, потужних автомобілів з ДВЗ. Їх виробники не повинні стояти осторонь, поки з благими намірами дезінформовані керівники «нищать» створені продукти і діючі виробництва. За іронією долі, електромобіль з його додатковою масою вимагатиме підвіски та гальм, як у вантажівки. Це потребує більш надійних гальм з чавуну та міцніших-жорсткіших деталей підвіски, що можуть задовольнити ливарники.

Всупереч заявам політиків і деяких керівників автомобільних компаній, автомобілі з ДВЗ домінуватимуть на ринку автомобілів протягом десятиліть. Для цього практичні варіанти збільшення ефективності автомобіля з ДВЗ полягають у подальшому підвищенні ефективності трансмісії, зменшенні коефіцієнта опору та маси автомобіля. Розробники та виробники автомобілів з ДВЗ мають

«впроваджувати інновації або померти» [1], зокрема обґрунтовуючи свої новації оцінками втіленої енергії в продукцію.

Серед ефективних методів зменшення втіленої енергії також є збільшення продуктивності ливарної форми та запобігання браку. Збільшення виходу придатного завдяки моделюванню процесу має суттєвий вплив на втілену енергію вилівка. Сучасні комп'ютерні моделі можуть допомогти виробляти вилівки «правильно з першого разу». З часом моделювання стане більш автоматизованим і нижчої вартості, його використання розшириться навіть на дрібносерійні ливарні програми для підвищення їх ефективності.

Протягом розвитку автопромисловості наявні спроби переводу деталей з чорних металів на алюміній для зменшення їх маси, що вимагає інвестицій у нові технології та устаткування. Це виявилось дорогим і енергоємним. Низька питома вага не завжди означає меншу вагу чи об'єм металовиробу. Доусон С. та ін. показали, що з чавуну з компактним графітом (CGI) можливо створювати дизельні двигуни, які є меншими та легшими, ніж їхні аналоги з алюмінію [3]. Це не обов'язково від того, що блок з CGI важить менше, але конструкція з CGI (більшої жорсткості) скорочує довжину двигуна, знижуючи загальну масу, ніж у довшого двигуна з алюмінію. Дослідники повідомили [3] про випробування дизельного гібридного двигуна об'ємом 1,2 л з блоком з CGI і частково з полімерним корпусом (рис. 1). Цей двигун замінює алюмінієвий блок при однаковій масі та значно нижчих втіленій енергії і вартості.

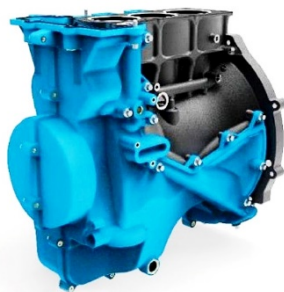


Рис. 1. Блок двигуна з пластиковими кришками в зборі важить 20,06 кг

Також дизайнери порівняли енергію життєвого циклу для автомобільного верхнього елемента керування, виготовленого з високоміцного чавуну (ВЧ) і литого алюмінію, та виявили [1], що енергія аналізу життєвого циклу (LCA)

конструкції з ВЧ на 40-43 % нижча, ніж у такої з литого алюмінію. Далі вони порівняли конструкцію ADI зі штампованою/зварною сталеву конструкцією та виявили, що енергія життєвого циклу ADI була на 7 % нижчою.

Генеалогічне дерево матеріалу – чавуну налічує понад 3000 років і має багато цікавих гілок. Сирій чавун, ковкий чавун, чавун з компактним графітом, ВЧ, чавун з високим вмістом кремнію та молібдену; загартований ВЧ та зміцнений феритний ВЧ із високим вмістом кремнію мають унікальні властивості та зрілі ринки [4]. Відносно висока жорсткість і співвідношення міцності до ваги роблять чавун оптимальним вибором, якщо ми максимально використаємо ці властивості в процесі проектування і виробництва.

Як зазначалося вище, лиття металу є найнижчим за енергоспоживанням виробництвом металовиробів. Це означає, що всі ковані та зварні вироби, як і багатокомпонентні вузли є «кандидатами» на перетворення в металеве литво. Так історично склалося, що металурги були ледачими. Легко продати конкретний литий матеріал/процес людям, які вже купують і використовують цей матеріал. Значно складніше, хоча й вигідніше, продавати вилівки клієнтам, які раніше купували зварні вироби, поковки та вузли або комбінацію литого матеріалу з іншим процесом [1].

Для проектування ливарних процесів корисним засобом Індустрії 4.0 є Integrated Computational Materials Engineering (ICME) [1]. Ця технологія обіцяє розробку сплавів, термообробку та обробку поверхні на рівні індивідуального кристала, заміну атомів і моделювання впливу на макровластивості матеріалу. Чавун із достатнім вмістом кремнію дозволяє атомам вуглецю бути рухливими в матриці. Також, щоб зменшити втілену енергію та знизити витрати на чавун, слід використовувати менше чушкового чавуну (15 МДж/кг) і більше сталевого брухту (6 МДж/кг) [1]. Але немало сталевого брухту містить 0,60-0,90 % Mn, а виробники ВЧ націлені на вміст Mn менше 0,35 % для кращих властивостей, відсутності карбідів і хорошої оброблюваності. Яким може бути шлях, наприклад, до високоякісного ВЧ з 0,60 % Mn? Протягом багатьох років ми спостерігали виробників, які виробляли якісний ВЧ з 0,40 % Mn, використовуючи модифікатори

і методи, що збільшували кількість вкраплень графіту понад 400 шт/мм². Наприклад, у відділі В.Б. Бубликова отримували 1000 вкраплень/мм² методом інмолд. Також виняткове відношення міцності до ваги має ADI. Щоб повністю використати це співвідношення, слід досягти його для значно меншої товщини литих стінок, оскільки ливарники побоюються лити профілі тонше 5 мм через габаритні та металургійні причини. У критичних ділянках можуть утворюватися карбіди, що негативно впливає на властивості.

Щоб ще більше використати високе співвідношення міцності до ваги ADI, нам потрібно виробляти нетвердосплавні виливки зі стінками товщиною 3 мм і застосовувати цю можливість до біонічних конструкцій, для чого сприятливий метод лиття за моделями, що газифікуються, для якого в останній час прагнуть застосувати 3D-друковані моделі зі спрямованою пористістю.

Поширення 3D-друку на виготовлення ливарних піщаних форм, особливо з неорганічними зв'язувальними матеріалами, також має значну перспективу, але друк має бути швидшим та дешевшим для вдалого конкурування з традиційними технологіями.

Література:

1. Keough J. The perspective of life cycle analysis in market decisions // *Modern Casting*. – 2023. – October. – P. 34–37.
2. Дорошенко В.С., Гнатуш В.А. Литво для електромобіля. Алюміній замість чавуну. XIII Міжнар. наук.-техн. конф. «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021»: матеріали науково-техн. конф., 28-29.04.2021, Київ / заг. ред. Р.В. Лютий, І.М. Гурія. – Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2021. – С. 66–68.
3. Dawson, S., Ferrarese, A., Marquard, R. Cast Iron Cylinder Blocks: Same Weight as Aluminum; Lower Emissions // *SAE Technical Paper 2023-01-0439*. – 2023. <https://doi.org/10.4271/2023-01-0439>.
4. Гнатуш В.А., Дорошенко В.С. Сучасне застосування металевих сплавів для автомобілебудування // *Метал та лиття України*. – 2019. – № 10-12. – С. 74–81. <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.10.074>.