УДК 669.744.072.2/338.3

В. С. Дорошенко, *д-р техн. наук, ст. наук. співр.,*
e-mail: doro55v@gmail.com

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ПРИКЛАДИ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИТИХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ УСТАНОВОК ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ЦЬОГО ЛГМ-ПРОЦЕСУ

Україна має недостатньо енергоресурсів, що потребує проводити щорічну їх закупівлю у значному обсязі, як для потреб промисловості, так і населення. Тому розвиток відновлювальної енергетики в Україні є актуальним завданням промислового масштабу. В конструкціях вітрових електростанцій застосовують доволі крупні корпусні литі деталі, замовлення на які поширились серед підприємств Європи. Виробництво даних виливків поки повільно освоюється в Росії, Україні, Казахстані на сучасному технічному рівні. Активний розвиток попиту актуалізує питання вибору відповідних для такого лиття технологій, а ливарним заводам з адаптованими для цього технологіями гарантується стабільне збільшення замовлень на виготовлення виливків для вітрових електростанцій. У Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України відпрацьовано технологію лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), корпусних виливків такого плану, чому і присвячена дана стаття з переліком варіантів і коротким аналізом такого ЛГМ-процесу, якому властивий ряд переваг завдяки застосуванню вакууму в піщаних формах, обвідної ливникової системи фігурної конфігурації моделюванням по пінополістиролу, варіюванню розташування моделі в формі з сипкого піску тощо. Виливки для вітрових електростанцій та іншого обладнання відновлюваної енергетики мають переконливу перспективу для виготовлення в вітчизняних ливарних цехах найбільш економічним для такого лиття способом – ЛГМ. Активний розвиток попиту на такі виливки викликаний будівництвом вітрових електростанцій в світі та Україні, що при подальшому зростанні гарантує ливарним заводам збільшення замовлень на виготовлення такого литва. Вже зараз Україна здатна освоювати та розвивати новітні ливарні технології для виробництва інноваційних вітрових електростанцій на шляху досягнення позицій виробника обладнання з високою доданою вартістю.

Ключові слова: *вітроенергетика, вітрові електростанції, виливки, литі конструкції, редуктор, лиття за моделями, що газифікуються, пінополістирольні моделі, лопаті.*

Серед ряду глобальних проблем сучасного світу відома проблема обмеження природних ресурсів. Кожну хвилину енергетика світу споживає велику кількість нафти, газу і вугілля. І необхідність використання відновлюваних джерел енергії зумовлюється не тільки обмеженими запасами викопних палив, але і вимогами до зменшення викидів в атмосферу парникових газів, які впливають на тепловий баланс планети. В Україні недостатньо енергоресурсів, що потребує проводити щорічну їх закупівлю у значному обсязі, як для потреб промисловості, так і населення. Тому розвиток відновлювальної енергетики в Україні є актуальним завданням промислового масштабу. Доцільність використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) визначається, перш за все їх економічною ефективністю та

конкурентоздатністю порівнянно з традиційними енергетичними технологіями [1], що пояснюється невичерпністю ВДЕ, відсутністю потреби у транспортуванні, екологічністю, бо вони не забруднюють навколишнє середовище і зменшують загрозу шкідливого парникового ефекту.

На даний час частка відновлюваних джерел енергії загалом у світовому енергоспоживанні складає близько 16,7 % [1]. У 2019 р. вітер став найбільшим джерелом поновлюваної енергії в США, обігнавши при цьому гідроенергетику (https://www.cnbc.com/). За інформацією Reuters, на німецькому ринку 2018 р. поновлювані джерела енергії випередили вугілля в якості головного ресурсу електроенергетики країни: вперше у вказаному році на ВДЕ прийшлося більше 40 % в цьому сегменті, а на 2019 р. встановлена потужність вітроенергетики ФРН (наземної та офшорної) склала майже 61,5 ГВт. Також за даними сайту energy-charts.de, що належить Інституту сонячних енергетичних систем (Fraunhofer ISE), за 17–23 лютого 2020 р. вітроенергетика виробила близько 55 % електрики в ФРН, чому сприяла вітряна погода. Мова йде про нетто-вироблену електроенергію, споживання електроенергії на самих електростанціях і виробництво електрики на промислових підприємствах для власних потреб не враховували.

На території України зараз діє ряд вітрових (ВЕС) та сонячних (СЕС) електростанцій, загальна потужність яких не перевищує 8 % потужності діючих електростанцій, що постачають електроенергію об'єднаній енергетичній системі (ОЕС) України [1]. За останні два роки приріст потужності нових вітрових і сонячних станцій збільшився у сім разів, а у 2035 р., згідно Енергетичної стратегії України, частка виробленої ними електроенергії повинна скласти 25 % від загальної кількості електроенергії в країні [1].

Аналіз інформації про діючі в Україні ВЕС показав, що більшість з них побудовано у Миколаївській, Херсонській та Запорізькій областях. Найбільш потужна Ботієвська ВЕС (200 МВт), побудована в 2012 р. у селищі Ботієво Приазовського району. Експлуатація цієї ВЕС протягом 20 років зможе дати економію 34,8 млн. т вугілля, а кожен рік роботи станції знизить шкідливі викиди CO_2 приблизно на 730 тис. т. На Ботієвській станції використовується 65 турбін датської компанії VESTAS. Висота башти одного вітряка складає 94 м, а загальна висота конструкції – 149 м [1]. У грудні 2018 р. підписано договір з компанією VESTAS про будівництво Орловської ВЕС у Запорізькій обл. Її вітропарк складатиме 26 турбін потужністю 3,8 МВт кожна, а кількість електроенергії, що буде вироблятися цією ВЕС, дозволить забезпечити потреби 200 тис. домогосподарств області. Генерація Орловською ВЕС дозволить скоротити викиди CO_2 порівняно з діючими електростанціями ~ на 400 тис. т в рік [1].

В конструкціях ВЕС застосовують доволі крупні корпусні литі деталі, тому замовлення на такі виливки поширились серед підприємств Європи. Потреба в цих виливках лише для складальних заводів Німеччини сягає кількох млрд. євро в рік [2]. Виробництво даних виливків поки повільно освоюється в Росії, Україні, Казахстані на сучасному технічному рівні. Корпусні виливки для вітряних електростанцій нерідко є важкими і об'ємними, тому на ряді заводів їх виготовляють в формах з холоднотвердних сумішей – шляхом ХТС-процесу (рис. 1) [2, 3]. Активний розвиток попиту актуалізує питання вибору відповідних для такого лиття технологій, а ливарним заводам з придатними для цього технологіями гарантується стабільне збільшення замовлень на виготовлення виливків для ВЕС.

У Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України під керівництвом проф. Шинського О. Й. відпрацьовано технологію лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), корпусних виливків такого плану, чому і присвячена дана стаття з переліком варіантів і коротким аналізом ЛГМ-процесу. Для демонстрації литих конструкцій у складі гондоли ВЕС представлено схему (рис. 2). Також виливки у складі редуктора показано на рис. 3.

Пінополістирольні моделі, згідно ЛГМ-процесу, для крупних виливків (конструкцій,

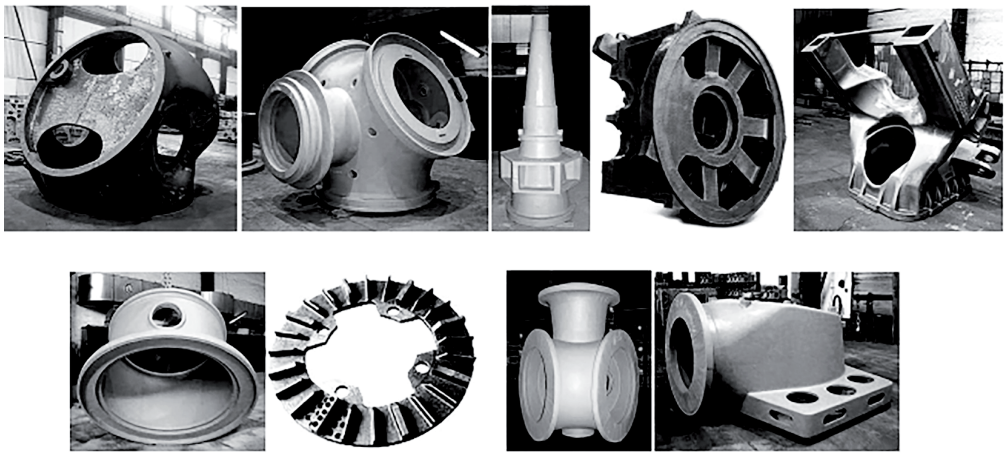

Рис. 1. Типові металеві виливки для ВЕС [2, 3], обриси багатьох з них вказано на рис. 2

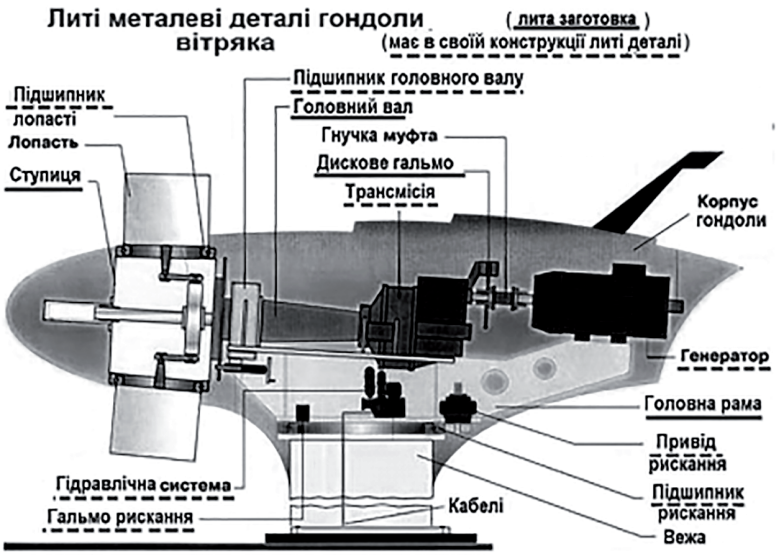

Рис. 2. Схема гондоли, де вказано деталі з литих заготовок та агрегати, що мають в своєму складі литі деталі

як на рис. 1, 3), дрібних і середніх серій виготовляють на фрезерних станках з ЧПУ (рис. 4, верхній ряд) або за шаблонами, вирізаючи складові моделі на спеціальних столах, нагрітих ніхромовим дротом [4, 5] (рис. 4, два нижніх ряди). На рис. 5 показано типові литі деталі механічного редуктора та гідросистеми, зазначені на схемі у складі конструкції гондоли (рис. 2).

Рис. 3. Схема литих деталей у складі редуктора, встановленого в гондолі вітряка

Собівартість виливків за ЛГМ-процесом дешевша, ніж для литва за ХТС-процесом, особливо на основі формувальних піщаних ХТС з органічними смолами в якості зв'язуючого. Інститутом ФТІМС НАН України також відпрацьовано лиття крупних заготовок (до 6 тонн) за газифікованими моделями у піщані опочні форми з

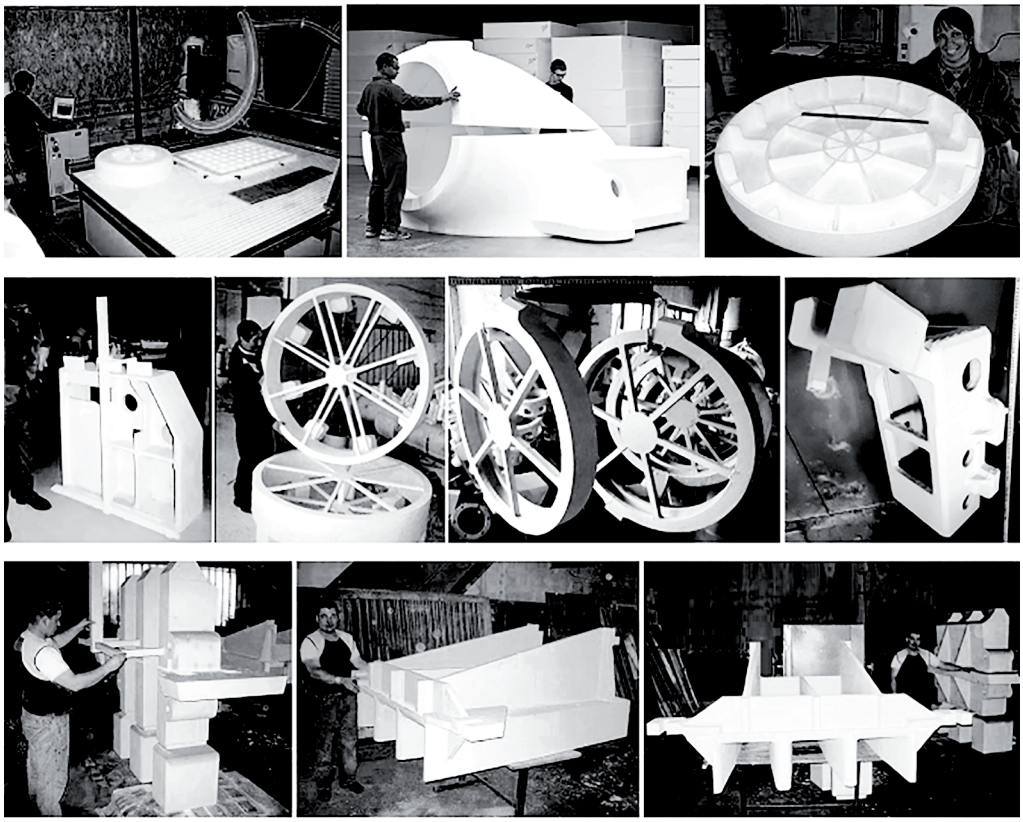

Рис. 4. Виготовлення ливарних пінополістирольних моделей для крупних виливків

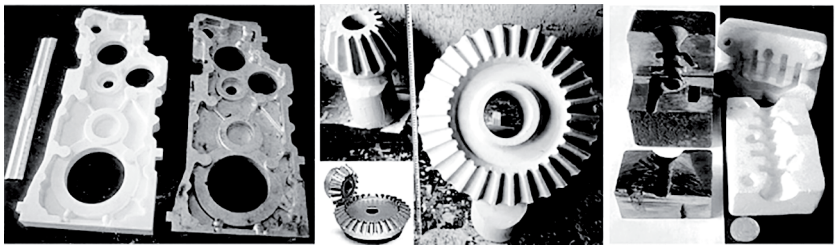

Рис. 5. Приклади типових моделей та литих деталей редуктора та гідросистеми

наливних піщано-рідкоскляних холодно-твердних сумішей [5]. Взагалі, процес лиття металу у форми з ХТС за моделями, що газифікуються, носить назву «full-mold casting».

На рис. 6 показано приклади лиття лопатей для турбін та вентиляторів, а на рис. 7 – литі лопаті для вітрогенераторів. Останні мають відносно більшу довжину і потребують застосування ливарних сплавів високої рідкотекучості, зокрема евтектичних сплавів системи Al–Si. Для виробництва таких крупногабаритних тонкостінних виливків важливо застосовувати як досвід лиття під тиском [6] в металевих формах, лиття з ізостатичним пресуванням в піщаних формах за ЛГМ-процесом [7], лиття з кристалізацією металу під тиском в таких же формах [8], так і оптимальну комбінацію корисних властивостей цих способів для такого специфічного лиття.

Різновиди ЛГМ-процесу, як ніякі інші способи піщаної формовки, дозволяють: застосовувати ливникову систему (фігурної конфігурації з урахуванням законів гідравліки) із ступінчастим живленням розплаву металу вздовж всього виливка

Рис. 6. Приклади литих лопатей для турбін та вентиляторів

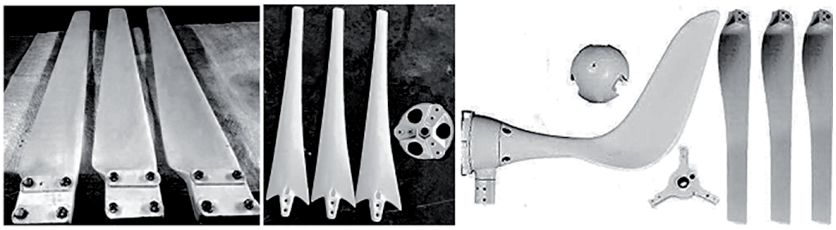

Рис. 7. Литі лопаті для вітрогенераторів

тонкостінної лопаті; робити промивні і вентиляційні випори та живильні надливи, в тому числі з виведенням їх на поверхню контрладу форми; виконувати наскрізні вентиляційні канали вздовж тіла пінополістирольної моделі лопаті та створювати в цих каналах газове розрідження, яке реалізує ефект вакуумного всмоктування розплаву металу, що заливається у вакуумовану піщану форму; забезпечувати оптимальне позиціонування разової моделі в піщаній формі для заповнення такої форми металом та направленого його затвердіння; швидко виготовляти складнофасонні моделі на 3D-фрезерах, а також, за потреби моделі, прес-форм для крупносерійного лиття завдяки винятково легкій механічній обробці пінополістиролу [4, 9].

Якісні виливки відіграють значну, якщо не основну, роль у виробництві вітряних модулів. Саме литі конструкції служать для передачі енергії вітру від лопатей несучого гвинта до генератора. Такі виливки вітроенергетичної групи, як станина, корпус несучого гвинта, цапфа осі, опора несучого гвинта, а також три поворотні перехідники лопатей на підшипниках, можуть становити загальною масою понад 6 т та, як правило, виливаються із високоміцного чавуну з кулястим графітом, здатного витримати значні навантаження [2]. Товщина стінок виливків становить 16–30 мм.

Виливки для вітряних електростанцій, а також іншого обладнання відновлюваної енергетики, мають перспективу для виготовлення в вітчизняних ливарних цехах. Освоєння виробництва таких виливків вимагає сучасного технічного рівня ливарних підприємств, до якого відноситься ЛГМ-процес, що сприятиме здешевленню програми розвитку вітроенергетики порівняно з литтям у форми з ХТС. Активний розвиток попиту на такі виливки викликано будівництвом вітрових електростанцій у світі та Україні, що при подальшому зростанні гарантує ливарним заводам збільшення замовлень на виготовлення такого литва. Вже зараз Україна здатна освоювати та розвивати новітні ливарні технології і дивувати світ виробництвом інноваційних вітрових електростанцій на шляху виходу в міжнародному поділі праці з зони позиціонування як сировинний придаток до позицій виробника обладнання з високою доданою вартістю.

Список літератури

1. Козлоков О. Ю., Голощапов В. М., Котульська О. В., Парамонова Т. М. Аналіз стану та тенденції розвитку відновлюваної енергетики в Україні. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: "Гідравлічні машини та гідроагрегати"*. 2019. № 2. С. 117–120.
2. Веревкин А. Г., Ромашов К. Н. Производство крупных чугунных отливок для ветряных электростанций на оборудовании фирмы FAT по XTC-процессу на заводе Meuselwitz Guss, Германия. *Литейщик России*. 2008. № 9. С. 41–47.
3. Григорьева Е. В. Производство крупных отливок для энергосиловых установок на оборудовании фирмы FAT, Германия по XTC – процессу. *Литье Украины.* 2015. № 3. С. 10–15.
4. Дорошенко В. С., Бердыев К. Х. Современные способы изготовления литейных моделей из пенопластов. *Оборудование и инструмент для профессионалов*. 2010. № 5. С. 80–82. № 6. С. 90–92.
5. Дорошенко В. С., Болюх В. А. Получение крупных стальных отливок по газифицируемым моделям с использованием наливной формовки. *Тяжелое машиностроение*. 2010. № 10. С. 16–20.
6. Дорошенко В. С., Шейко Н. И. Литье под низким давлением крупно-габаритных гидроплотных деталей. *Литейное производство*. 1990. № 6. С. 13–14.
7. Дорошенко В. С. Автоматизация изостатического прессования затвердевающей отливки при литье по газифицируемым моделям. *Процессы литья*. 2016. № 1. С. 33–37.
8. Шинский О. И., Дорошенко В. С. Варианты использования на роторно-конвейерных линиях способов литья с кристаллизацией металла под давлением. *Процессы литья*. 2019. № 6. С. 24–37.
9. Дорошенко В. С., Шинский И. О. 3D-технологии при литье по газифицируемым моделям. *Металл и литье Украины.* 2009. № 4–5. С. 30–33.

Надійшла 05.03.2020

References

1. Kozlokov, O. Yu., Goloshapov, V. M., Kotulska ,O. V., Paramonova, T. M. (2019) Analysis will become the tendency of development of renewed energy in Ukraine. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Hydraulic machines and hydraulic units*, 2, 117–120 [in Ukrainian].
2. Verevkin, A. G., Romashov, K. N. (2008) Production of large cast iron castings for wind power plants using FAT equipment for the XTS process at Meuselwitz Guss, Germany. *Russian Foundrymen,* 9, 41–47 [in Russian].
3. Grigoreva, E. V. (2015) Production of large castings for power plants using equipment from FAT, Germany according to the CTS process. *Casting of Ukraine*, 3, 10–15 [in Russian].
4. Doroshenko, V. S., Berdyev, K. H. (2010) Modern methods of manufacturing foundry patterns of foam. *Equipment and tools for professionals*, 5, 80–82; 6, 90–92 [in Russian].
5. Doroshenko, V. S., Bolyuh, V. A. (2010) Obtaining large steel castings according to gasified patterns using bulk molding. *Heavy engineering (Tyazheloe mashinostroenie),* 10, 16–20 [in Russian].
6. Doroshenko, V. S., Sheiko, N. I. (1990) Low-pressure casting of large-sized hydro-tight parts. *Foundry Technologies and Equipment (Liteinoye proizvodstvo)*, 6, 13–14 [in Russian].
7. Doroshenko, V. S. (2016) Automation of isostatic pressing of hardened castings during the Lost Foam Casting process. *Casting processes*, 1, 33–37 [in Russian].
8. Shinskii, O. I., Doroshenko, V. S. (2019) Use cases for rotor-conveyor lines of casting methods with crystallization of metal under pressure. *Casting processes,* 6, 24–37 [in Russian].
9. Doroshenko, V. S., Shinskii, I. O. (2009) 3D-technologies during the Lost Foam Casting. *Metal and casting of Ukraine*, 4–5, 30–33 [in Russian].

Received 05.03.2020

V. S. Doroshenko, *Dr. Sci. (Engin), Leading Researcher,*
e-mail: doro55v@gmail.com

Physico-technological Institute of Metal and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

EXAMPLES OF MANUFACTURING CAST PARTS FOR WIND POWER PLANTS AND PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF THIS LGM PROCESS

Ukraine has insufficient energy resources, which requires their annual purchase in a significant amount, both for the needs of industry and the population. Therefore, the development of renewable energy in Ukraine is an urgent task on an industrial scale. The constructions of wind power plants use rather large case cast parts, orders for which were distributed among European enterprises. The production of these castings is slowly being mastered in Russia, Ukraine and Kazakhstan at the modern technical level. Active development of demand actualizes the issue of choosing suitable technologies for such casting, and foundries with such technologies are guaranteed a steady increase in orders for the manufacture of castings for wind farms. The Physics and Technology Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine has developed the casting technology for the Lost Foam Casting process (LFC) of body castings of such a plan. This article is devoted to this, with a list of options and a brief analysis of such an LFC process, which has a number of advantages due to the use of vacuum in sand molds, a bypassed gating system of a shaped configuration by polystyrene foam modeling, varying the location of the pattern in the mold of loose sand, etc. Castings for wind farms and other equipped I have renewable energy convincing perspective for the manufacture of domestic foundries in the most economical manner for such casting LFC. The active development of demand for such castings is caused by the construction of wind farms in the world and Ukraine, which with further growth guarantees foundries an increase in orders for the manufacture of such castings. Already, Ukraine is able to master and develop new foundry technologies for the production of innovative wind farms on the way to achieving the position of a manufacturer of equipment with high added value.

Keywords: *wind energy, wind power stations, castings, cast structures, gearbox, Lost Foam Casting, polystyrene foam patterns, blades.*