



Vitalii V. Manko
Манько Віталій
Володимирович

УДК 629.5.035

STRENGTH ASSESSMENT OF CAST SHIP PROPELLER BLADES: METHOD ADAPTATION FOR WAAM WITH INTEGRATION OF CELLULAR STRUCTURES

ОЦІНКА МІЦНОСТІ ЛОПАТЕЙ ЛИТОГО СУДНОВОГО ГВИНТА: АДАПТАЦІЯ МЕТОДУ ДО WAAM З ІНТЕГРАЦІЄЮ КОМІРЧАСТИХ СТРУКТУР

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2025.2\(21\).05](https://doi.org/10.15589/smi2025.2(21).05)

Vitalii V. Manko

Манько Віталій Володимирович,
аспірант
MankoVit48@gmail.com
ORCID: 0009-0006-3554-7374

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв

Abstract. Target. The purpose of this study is to adapt the strength calculation methodology for cast propeller blades to the manufacturing conditions of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), with the potential integration of hollow lattice structures.

Method. Using numerical modeling tools in SolidWorks, a stress-strain analysis of cast propeller blades was carried out under free-flow conditions and in the presence of a non-uniform wake field behind the hull. The mechanical properties of WAAM-produced nickel-aluminum bronzes were analyzed, taking into account anisotropy and residual stresses, in order to incorporate these factors into the adapted strength assessment method.

The results. The study confirms the feasibility of further implementation of lattice structures in the design of WAAM-fabricated propellers to reduce weight and material consumption without significant loss of strength. A comparative analysis between cast and WAAM propellers revealed differences in strength assessment approaches and identified the zones most suitable for the integration of hollow elements in a specific propeller design.

Scientific novelty. A practical approach to the strength assessment of propellers manufactured using the WAAM method has been substantiated, taking into account technological specifics and the presence of cellular structures.

Practical significance. The proposed approach can be used in the design of lightweight and reliable marine propellers, which will help reduce production costs and improve operational efficiency.

Key words: propeller blades; operational loads; lattice structures; WAAM; non-uniform wake field; stress-strain state.

Анотація. Мета. Метою дослідження є адаптація методики розрахунку міцності лопатей литого гребного гвинта до умов виготовлення за допомогою дрово-дугового адитивного виробництва (WAAM) з можливістю інтеграції пустотілих комірчастих структур.

Методика. За допомогою інструментів числового моделювання в SolidWorks проведено аналіз напружено-деформованого стану лопатей литого гвинта у вільному потоці та в умовах нерівномірного поля швидкостей за корпусом судна. Проаналізовано механічні властивості нікель-алюмінієвих бронз, виготовлених методом WAAM, з урахуванням анізотропії та залишкових напружень, з метою інтеграції особливостей у процес оцінки міцності.

Результати. Дослідження підтверджує доцільність подальшого впровадження комірчастих структур у конструкцію гвинтів, виготовлених WAAM, з метою зменшення маси та витрат матеріалу без суттєвої втрати міцності. Порівняльний аналіз литих і WAAM-гвинтів виявив відмінності в підходах до оцінки міцності та дав змогу визначити зони, найбільш придатні для інтеграції пустотілих елементів у конкретну конструкцію гвинта.

Наукова новизна. Обґрунтовано підхід до оцінки міцності гребних гвинтів, виготовлених методом WAAM, з урахуванням технологічних особливостей і наявності комірчастих структур.

Практична значимість. Запропонований підхід може бути використаний для проєктування легких і надійних судових гвинтів, що сприятиме зниженню витрат на виробництво та підвищенню ефективності експлуатації суден.

Ключові слова: лопаті гвинта; експлуатаційні навантаження; комірчасті структури; WAAM; нерівномірне поле швидкостей; напружено-деформований стан.

References

- [1] Zhang, Z., Yan, J., Lu, X., Zhang, T., & Wang, H. (n.d.). Optimization of porosity and surface roughness of CMT-P wire arc additive manufacturing of AA2024 using response surface methodology and NS-GA-II. Civil Aviation University of China, Tianjin University of Technology and Education.
- [2] Orzolek, S. M., Semple, J. K., & Fisher, C.R. (2021). Nickel-Aluminum Bronze (NAB) Review: Additive Manufacturing and Weldability. *Journal of Materials Processing Technology*, 29–30.
- [3] Kim, J., Kim, J., & Pyo, C. (2020). Comparison of Mechanical Properties of Ni-Al-Bronze Alloy Fabricated through WAAM with Cast Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*.
- [4] Roshan, M., Mahtabi, M. B., Ranjbar Eslamloo, S., Behvar, A., & Haghshenas, M. (2024). Review on Fatigue Characteristics of NAB: Conventional and Additive Methods. *University of Toledo, USA*.
- [5] Bureau Veritas (2025). *Rules on Materials and Welding for Classification of Marine Units* (NR216).
- [6] Bercelli, L., Moyne, S., Dhondt, M., Doudard, C., Calloch, S., & Beaudet, J. (2021). Probabilistic Approach for HCF of WAAM Parts Considering Process-Induced Pores. *Additive Manufacturing*, 42, 101989.
- [7] Shakil, S. I., Shakerin, S., Rahmdel, K., et al. (2024). Fatigue Response of WAAM NAB in Post-Annealed Condition. *International Journal of Fatigue*, 108472.
- [8] Dharmendra, C., Amirkhiz, B. S., Lloyd, A., Ram, G. D. J., & Mohammadi, M. (2020). WAAM NAB with Enhanced Mechanical Properties via Heat Treatments. *Additive Manufacturing*, 36, 101510.
- [9] Shen, C., Mu, G., Hua, X., Li, F., Luo, D., Ji, X., & Zhang, C. (2019). Influences of Heat Treatments on Anisotropy of WAAM-Fabricated NAB. *Journal of Manufacturing Processes*.
- [10] RAMLAB (2017). *RAMLAB unveils world's first class-approved 3D printed ship's propeller*. Retrieved from <https://www.ramlab.com/updates/ramlab-unveils-worlds-first-class-approved-3d-printed-ships-propeller>
- [11] RAMLAB (2018). *RAMLAB and Huisman initiate consortium to produce world's heaviest 3D printed steel crane hook*. Retrieved from <https://www.ramlab.com/updates/ramlab-huisman-initiate-consortium-produce-worlds-heaviest-3d-printed-steel-crane-hook>
- [12] Huisman Equipment (2018). *Huisman scales up 3D printing of crane hooks*. Retrieved from https://www.huismanequipment.com/en/media_centre/press_releases/163-155_Huisman-scales-up-3D-printing-of-crane-hooks
- [13] Taylor, D. W. (1893). *The Speed and Power of Ships: A Manual of Marine Propulsion*. Washington, DC: Government Printing Office.

- [14] Mackenzie, C. (2021, January 13). Naval Group prints first propeller for powering French warship. *Defense News*. Retrieved from <https://www.defensenews.com/global/europe/2021/01/13/naval-group-prints-first-propeller-for-powering-french-warship/>
- [15] Valpolini, P. (2019, February 7). Naval Group and Centrale Nantes: the world's first hollow propeller blade. *EDR Magazine*. Retrieved from <https://www.edrmagazine.eu/naval-group-and-centrale-nantes-the-worlds-first-hollow-propeller-blade>
- [16] Nota, C., Rückert, G., Heuzé, J. L., Carlino, L., Quenez, J. M., & Courregelongue, L. (2023). A first feedback on manufacturing and inservice behaviour of a WAAMmade propeller for naval application. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- [17] Ya, W., & Hamilton, K. (2023). On-Demand Spare Parts for the Marine Industry with Directed Energy Deposition: Propeller Use Case. *Journal of Marine Engineering and Technology*.
- [18] Queguineur, A., Rückert, G., Cortial, F., & Hascoët, J. Y. (2017). Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- [19] Klötzer-Freese, C., Kruse, T., Khalil, M., & Greitsch, L. (2024). Hybrid manufacturing of a hollow ship's propeller – investigation from material characterization to implementation. *Mecklenburger Metallguss GmbH*, Waren, Germany.

Постановка задачі. Суднобудування стоїть на порозі технологічної революції завдяки адитивним методам виробництва, зокрема дрово-дуговому наплавленню (WAAM). Однак масштабне впровадження WAAM у виробництві гребних гвинтів обмежене через відсутність стандартизованих методів оцінки міцності та надійності таких конструкцій.

Ця робота спрямована на дослідження можливості застосування WAAM для створення гребних гвинтів із комірчастими порожнистими структурами, що дасть змогу знизити їх масу та витрати матеріалу без втрати міцності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У світовій науково-технічній літературі накопичено значний досвід дослідження властивостей металевих виробів, виготовлених методом WAAM. У суднобудуванні це знайшло своє відображення в низці робіт, які демонструють реальне застосування WAAM для гребних гвинтів. Наприклад, у [16] проаналізовано досвід експлуатації гвинта для військового судна, виготовленого за технологією WAAM.

Крім того, у [17] розглянуто можливості швидкого виготовлення запасних частин для морських суден із застосуванням Directed Energy Deposition, зокрема гребних гвинтів, що підкреслює потенціал технології для оперативного виробництва деталей.

Попри наявні роботи, питання комплексної оцінки міцності, зносостійкості та довговічності WAAM-гвинтів, особливо з порожнистими структурами, залишається маловивченим. У дослідженнях [18, 19] акцент зроблено переважно на аналізі механічних властивостей компонентів, тоді як питання впливу пористих структур, залишкових напружень та анізотропії матеріалу на поведінку гребних гвинтів у нерівномірних полях швидкості поки що не отримало достатньої уваги.

Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми. На сьогодні залишається низка питань, які потребують подальшого вивчення: недостатня кількість досліджень, присвячених втомній міцності WAAM-компонентів, зокрема з комірчастими структурами; обмежені дані щодо механічних властивостей і анізотропії матеріалів, отриманих методом WAAM, з урахуванням напрямку наплавлення та режимів охолодження; відсутність стандартизованого підходу до оцінки міцності адитивно виготовлених судових гвинтів із порожнистими внутрішніми структурами.

Мета дослідження. Метою цього дослідження є адаптація методики оцінки міцності лопатей литого гребного гвинта до умов WAAM-технології з інтеграцією порожнистих комірчастих структур з урахуванням реальних експлуатаційних навантажень та особливостей структури матеріалу.

Методи дослідження. Числове моделювання (CFD + FEM) – аналіз гідродинаміки та напружень у SolidWorks.

Об'єктом дослідження є гребний гвинт буксирного судна-постановника якорів ($D = 4,3$ м, матеріал – NAB).

Предметом дослідження є оптимізація міцності та маси гребних гвинтів, виготовлених методом дрогово-дугового адитивного наплавлення (WAAM), завдяки використанню комірчастих пустотілих структур.

Основна частина. Сучасні адитивні технології (3D-друк) відкривають нові можливості для промисловості, зокрема суднобудування. Завдяки пошаровому наплавленню матеріалу можна виготовляти деталі складної геометрії, недоступні для виготовлення традиційними методами. Одна така деталь часто замінює цілу збірку, підвищуючи надійність виробу.

3D-друк дає змогу інтегрувати пустотілі комірчасті структури, локально змінювати мікроструктуру матеріалу, що сприяє економії ресурсів і наданню нових властивостей. У суднобудуванні, де критичні міцність, корозійна стійкість і довговічність, адитивні методи розглядаються як альтернатива литтю та механічній обробці.

Найперспективнішими технологіями для роботи з металами та виготовлення великогабаритних виробів є селективне лазерне плавлення (SLM), електронно-променево наплавлення з подачею дроту (EBAM) та дрогово-дугове адитивне виробництво (WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing).

Звісно, 3D-друк металами має свої недоліки. Одним з основних є висока вартість обладнання та матеріалів, процес «друку» металами може займати значну кількість часу, особливо в разі створення великих виробів. Також варто зазначити, що адитивні технології не забезпечують високої точності та якості поверхні, як традиційні методи обробки.

Так, у 2017 році за результатами тісної співпраці RAMLAB, Promarin, Bureau Veritas та Damen був представлений перший у світі судновий гребний гвинт, надрукований на 3D-принтері з використанням технології WAAM (рис. 1) [10]. Виріб виконано



Рис. 1. Процес друку гребного гвинта



Рис. 2. Встановлений гвинт на проєкті StanTug 1606

зі сплавом NAB ($\text{Cu-9Al-5Ni-5Fe-1Mn}$), має діаметр 1300 мм і масу 180 кг і встановлений на буксирі проєкту Damen StanTug 1606 (рис. 2) [10].

У 2018 році RAMLAB спільно з Huisman виконано друк гака морського крана з використанням технології дрогово-дугового наплавлення [11]. Гак мав розміри 1×1 м і важив близько 1000 кг – на той момент найбільший у світі сталевий виріб, виготовлений на 3D-принтері (рис. 3). У проєкті взяли участь DNV GL, Bureau Veritas та ABS як сторони контролю якості та сертифікації.

У 2021 році Huisman під наглядом Lloyd's Register успішно завершено тестування чотирьох надрукованих на 3D-принтері методом дрогово-дугового наплавлення гаків з високоміцної сталі, розрахованих на вантажопідйомність 350 т [12]. Кожен гак мав габарити $1,7 \times 1,3$ м і важив 1,7 т (рис. 4).

У 2021 році Bureau Veritas сертифікував гребний гвинт нового покоління, надрукований на 3D-принтері виробництва Naval Group [14]. Цей гвинт з діаметром 2,5 м, п'ятьма 200-кілограмовими лопатями був виготовлений компанією Naval Group за допомогою процесу 3D-друку металом і встановлений на мінному тральщику класу Tripartite (рис. 5).



Рис. 3. Процес друку гака



Рис. 4. Готовий виріб



Рис. 5. Гребний гвинт компанії Naval Group



Рис. 6. Дослідний зразок порожнистої лопаті

У рамках проекту H2020 RAMSSES компанії Naval Group та Centrale Nantes надрукували перший зразок порожнистої лопаті гвинта методом WAAM [15]. Демонстратор у масштабі 1:3 (рис. 6) з нержавіючої сталі (≈ 300 кг) було створено менш ніж за 100 годин. Мета – зниження ваги, вібрацій і шуму.

Хоча прикладів поки небагато, 3D-друк активно впроваджується в суднобудування, особливо метод WAAM – найдешевший і найпродуктивніший (1–10 кг/год). Прискорити впровадження можна завдяки зменшенню витрат на матеріали й час друку, що досягається шляхом оптимізації дизайну, зокрема через використання пустотілих структур без втрати міцності.

Процес WAAM може здійснюватися шляхом безпосереднього наплавлення дроту (MIG, MAG) або із застосуванням технології холодного перенесення металу (MIG CMT – Cold Metal Transfer). Перший підхід відзначається простотою реалізації, проте досягнення якісної дрібнозернистої структури, наприклад у сталях, потребує забезпечення лінійної енергії понад 500 Дж/мм. Це обмежує використання дротів малого діаметра, що, зі свого боку, визначає мінімальну товщину стінки готових виробів зі сталей понад 6 мм за висоти кожного шару 1–2 мм, а також призводить до значної шорсткості поверхні (до 500 мкм за однопрохідного друку).

Технологія холодного перенесення металу (CMT) забезпечує вищу ефективність, якість і точність наплавлення завдяки використанню тонших дротів (1,2–2 мм) і зниженню теплового впливу на вже сформований шар (< 200 Дж/мм). Це сприяє покращенню мікроструктури та стану поверхні виробу, що, зі свого боку, мінімізує потребу в механічній обробці. Мінімальна товщина стінок у разі застосування CMT становить 3–4 мм, а шорсткість не перевищує 50 мкм [1]. Більш точні характеристики залежать від використаного матеріалу для друку та режимів наплавлення.

Дослідження матеріалів, придатних для дрово-дугового наплавлення суднобудівних гвинтів, приділяють особливу увагу нікель-алюмінієвим бронзам (NAB), які широко використовуються в суднобудуванні.

ні. Дослідження, проведені Naval Surface Warfare Center Carderock Division [2] та Korea Institute of Industrial Technology [3], продемонстрували, що зразки NAB (Cu-9Al-5Ni-5Fe-1Mn), виготовлені за допомогою WAAM CMT, характеризуються покращеними властивостями порівняно з литим матеріалом, що зумовлено особливостями мікроструктури.

За умов помірних швидкостей охолодження ($>1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$), які досягаються в разі використання зварювальної дуги (пульсуючий GMAW та CMT), мікроструктура наплавленого NAB стає більш подрібненою, а обмежене виділення κ -фаз сприяє підвищенню корозійної стійкості порівняно з литим аналогом [4]. Це також призводить до покращення механічних характеристик наплавленого матеріалу, зокрема до збільшення межі плинності на 50 %, міцності на розрив на 17–20 % та пластичності на 60 % порівняно з литою бронзою. Крім того, NAB, виготовлена методом WAAM, демонструє вищу втомну міцність завдяки дрібнозернистій структурі, яка гальмує розвиток тріщин (рис. 7) [4]. Ці переваги зберігаються навіть після коректної процедури термічної обробки.

Термічна обробка NAB – ключовий етап адаптації матеріалу до умов експлуатації. Для литих гребних гвинтів важливо забезпечити пластичність не менше ніж 15–18 %, залежно від застосування, NAB може проходити відпал, гартування, нормалізацію, відпуск

або старіння. Відпал застосовується для зниження внутрішніх напружень із мінімальним впливом на мікроструктуру. Ці напруження, що виникають через температурні градієнти, суттєво впливають на втомну міцність і корозійну стійкість. Дослідження показують, що відпал за температури $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 2 годин знижує залишкові напруження на 76 %, а за $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ – на 96 %. Обробка також зменшує деформацію, стабілізує розміри та підвищує опір корозійному розтріскуванню [8].

Також наплавлений NAB, виготовлений за технологією дрово-дугового наплавлення, демонструє значно кращу стійкість до абразивного зносу порівняно з литим NAB. Ці переваги обумовлені більш однорідною мікроструктурою та підвищеною твердістю наплавленого матеріалу [3].

Як показують дослідження, дрово-дугове наплавлення з використанням технології холодного перенесення металу дає змогу створювати тонкостінні вироби з якістю, близькою до ливарної. Вироби з NAB після термообробки можуть мати підвищені граничні напруження, що робить WAAM перспективним методом для суднобудування, зокрема у виробництві гребних гвинтів.

Використання комірчастих структур дасть змогу зменшити масу, заощадити матеріали та скоротити час виготовлення. Основним викликом є визначення оптимальної конфігурації таких структур для

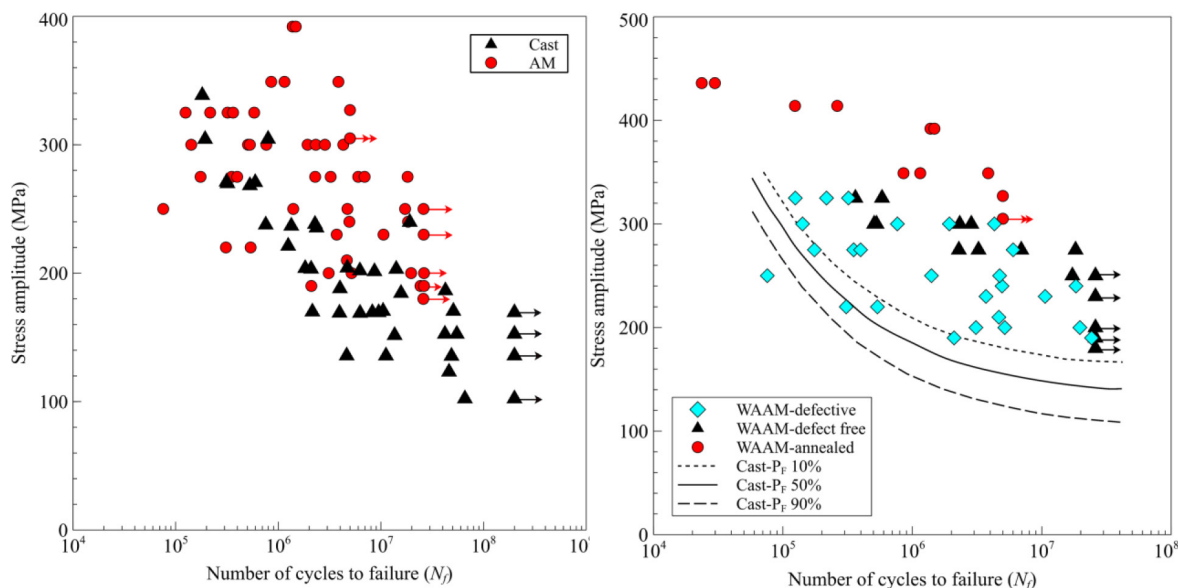


Рис. 7. Дані кривих втоми (S–N) для литого та виготовленого адитивним методом (WAAM) нікель-алюмінієвої бронзи (NAB), коефіцієнт асиметрії циклу $R = -1$ (згідно з [4])

забезпечення міцності, жорсткості та довговічності під впливом статичних і циклічних навантажень.

Важливо враховувати:

- анізотропію матеріалів, що виникає внаслідок WAAM (різниця межі міцності до 40 МПа у різних напрямках для NAB [9]), яку неможливо усунути повністю відпалом чи відпуском;
- оптимізацію геометрії комірчастих елементів, що дає змогу розподілити навантаження рівномірно та зменшити концентрацію напружень;
- технологічні фактори, як-от залишкові напруження, пористість, неоднорідність і мікротріщини;
- експлуатаційні умови, включно з кавітацією, вібраціями й нерівномірним обтіканням, що впливають на надійність виробу;
- баланс між міцністю та гідродинамікою, адже надмірна товщина лопатей може знижувати ефективність гвинта.

Для валідації конструкцій необхідне поєднання числового моделювання (FEM) і експериментальних.

Вимоги до оцінки міцності гребних гвинтів

Гребний гвинт працює в складних умовах:

- на лопаті діють нестационарні зовнішні сили;
- матеріал зазнає впливу морської води, що спричиняє електрохімічну корозію;
- високі гідродинамічні навантаження можуть викликати кавітацію.

Ці навантаження мають циклічний характер, з постійною та змінною складовими, що зумовлено нерівномірним полем швидкостей на диску гвинта через вплив корпусу судна. Унаслідок цього кути атаки й гідродинамічні сили змінюються під час обертання. Амплітуда змінної складової може сягати 50 % від середнього навантаження.

Зазвичай міцність гвинта оцінюється для нормальних умов без урахування аварійних випадків, які розглядаються окремо. На основі досліджень і вихрової теорії розроблено практичні методи оцінки міцності: Тейлора, Ромсома, Резинга, Кейсера – Арнольдуса [13]. Проте точнішим є підхід із безпосереднім урахуванням циклічно-ди-

намічних навантажень, що підтверджується випадками втомних руйнувань лопатей.

Гідродинамічні навантаження можуть визначатися числовим розв'язанням рівнянь Нав'є – Стокса, усереднених за Рейнольдсом (RANSE), з використанням методів обчислювальної гідродинаміки (CFD – Computational Fluid Dynamics). Це дає змогу моделювати повномасштабну геометрію гребного гвинта. Отримані результати слід верифікувати, порівнюючи з експериментальними даними.

Для забезпечення достовірності моделі потрібно:

- дослідити вплив розмірності сітки;
- оцінити значення параметра y^+ (відстань першого шару до поверхні);
- перевірити збіжність за часовим кроком.

Для точного відображення фізичних процесів слід деталізувати сітку в зонах передньої / задньої кромки, коренів і кінців лопатей, а також у зоні вихрового сліду.

На наступному етапі виконується механічний аналіз гвинта методом кінцевих елементів (FEM) з урахуванням геометричної нелінійності через великі прогини. У моделі враховують:

- розподіл навантажень, переданих із CFD;
- відцентрові сили;
- напружено-деформований стан з урахуванням властивостей матеріалу;
- модальний аналіз для уникнення резонансу.

Поєднання CFD та FEM дає змогу комплексно оцінити роботу гвинта, оптимізувати його конструкцію і підвищити ефективність та надійність.

Аналіз міцності лопатей литого гребного гвинта: порівняння роботи у відкритій воді та за корпусом судна з адаптацією метода до WAAM і комірчастих структур.

Для оцінки міцності використано гребний гвинт судна з тягою 150 т, призначеного для постановки якорів, пересування й обслуговування бурових установок. Характеристики судна та гвинта наведено в таблицях 1 і 2. Гідродинамічні навантаження визначаються числовим моделюванням у SolidWorks Flow Simulation, який розв'язує рівняння Нав'є – Стокса у RANSE-формі, для двох випадків:

у відкритій воді та за корпусом судна, із застосуванням методу обертальної області (Rotating Region). Модель доступна на <https://zenodo.org/records/15504015>.

Таблиця 1. Характеристики судна

Довжина найбільша судна, м	104
Ширина, м	20
Осадка, м	7,8
Висота борту, м	11
Кількість гвинтів, шт.	2
Швидкість, вуз.	14

Таблиця 2. Характеристики гребного гвинта

Тип гвинта	Фіксованого кроку
Кількість лопатей	4
Діаметр, м	4,3
Номинальний крок, м	3,900
Крокове відношення P/D 0,7	0,91
Середнє крокове відношення P/D	0,881
Кут нахилу	0°
Нахил на кінці лопаті	0°
Матеріал	NAV
Щільність матеріалу, г/см³	8,25
Вага лопаті без фланця, кг	~1300
Потужність на проектному кроці, кВт	7500
Проектна частота обертання, об/хв	155

Для забезпечення точності розрахунків у відкритій воді проведено дослідження збіжності сітки. Через обмеження прямого визначення параметра y^+ у Flow Simulation застосовано ітеративний підхід (див. таблицю 3). Метою ітерацій було досягнення збіжності за упором (T) та моментом (Q) за збільшення кількості елементів сітки. Після 3,1 млн (приклад розрахунку див. рис. 10) елементів швидкість зміни (ΔT , ΔQ) знижується та $\epsilon < 5\%$, що дає змогу припустити досягнення прийнятної збіж-

ності. Подальше збільшення деталізації дає незначне уточнення. Така сітка також дає змогу компенсувати обмеження y^+ та детально розбити пристінні шари у критичних зонах лопатей (рис. 8, 9). Часовий крок розрахунків адаптований, визначається автоматично.

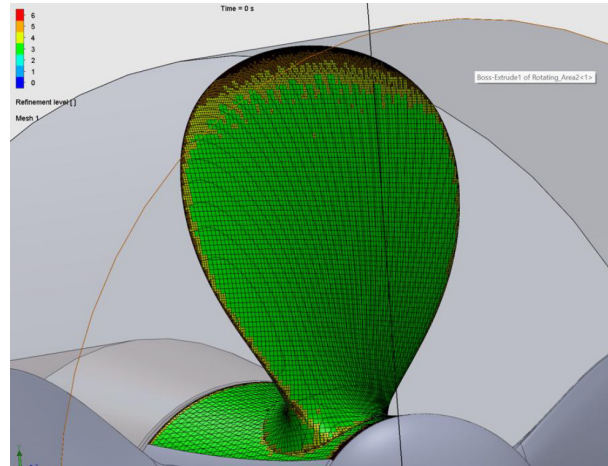


Рис. 8. Розбиття сітки поверхні лопаті

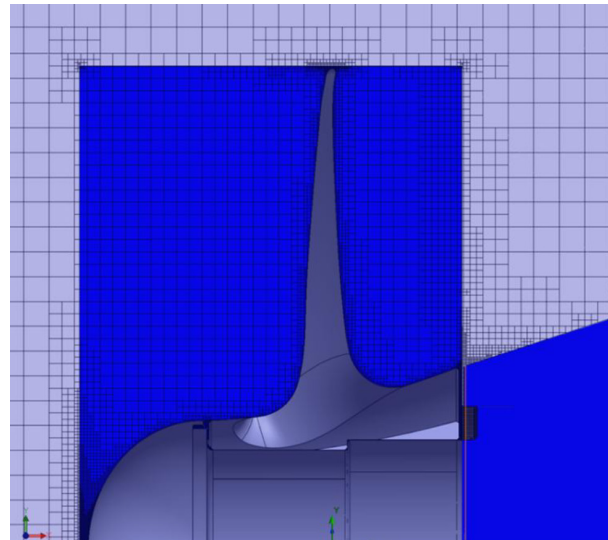


Рис. 9. Розбиття сітки пристінних шарів

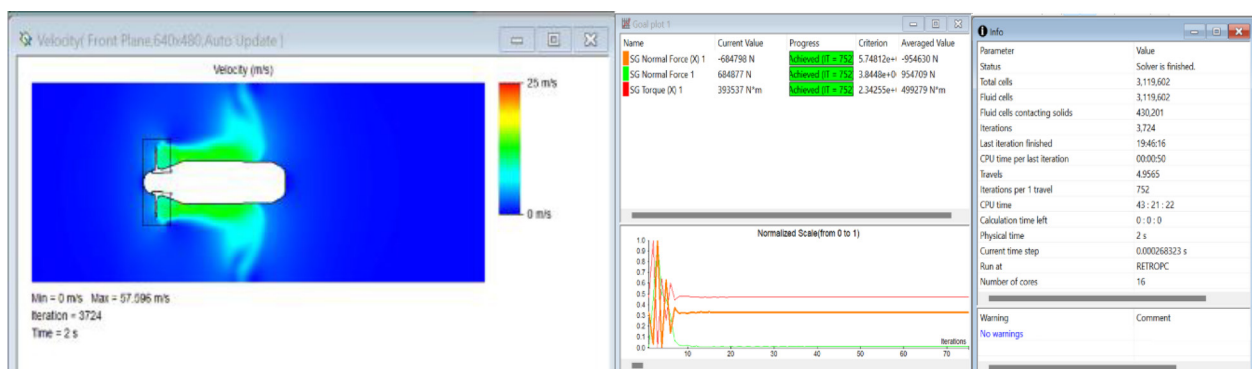


Рис. 10. Результату розрахунку для режиму роботи гребного гвинта на швартовах. Упор та момент гребного гвинта досягають найбільших значень, а коефіцієнт корисної дії (ККД) $\eta = 0$, оскільки гвинт не має переміщення

Розраховані в CFD поля тиску на лопатях використовуються для подальшого FEM-аналізу шляхом експорту даних до модуля Simulation.

Таблиця 3. Результати ітераційного процесу за швидкості потоку $V = 0$ вузлів

Ітерація	К-ть елементів (млн)	T , кН	Q , кН · м	ΔT , %	ΔQ , %
1	1,6	985,4	549,1	—	—
2	2,4	967,3	519,9	1,9	5,6
3	3,1	954,6	499,3	1,3	4,1
4	4,2	948	499,1	0,7	0,1
5	5,1	943,3	489,1	0,5	2,0

FEM модель гвинта враховує геометричну нелінійність, що виникає внаслідок деформацій лопатей під навантаженням, яке прикладається з кроком 0,1. Такий підхід особливо важливий для гвинтів із порожнистими чи комірчастими структурами, анізотропними матеріалами.

Розрахунок проводиться з урахуванням таких факторів:

- враховані відцентрові сили від обертання гвинта;
- граничні умови – жорстке кріплення гвинта до гондоли;
- гідродинамічні навантаження з CFD як основні;
- властивості матеріалу лопатей згідно NAB (Cu-9Al-5Ni-5Fe-1Mn);
- контроль реакцій і моменту для перевірки коректності імпорту тиску.

Сітка поетапно уточнюється в зонах максимальних напружень з метою підвищення точності їх розподілу по товщині лопаті (рис. 11). Подальше загушення сітки впливає на результати менше ніж на 5 %. Розподіл напружень за Мезісом та дотичні XY для 0 вузлів наведено на рис. 12 і 13, дані для різних швидкостей V – у таблиці 4.

У гребних гвинтах, виготовлених методом дрогово-дугового наплавлення, слід враховувати слабку анізотропію матеріалу. Ізотропний критерій Мізеса може бути недостатнім, тому доцільно також застосовувати критерії для анізотропних матеріалів, наприклад Мізеса – Хілла, що забезпечує точнішу оцінку напружень і зон можливого руйнування.

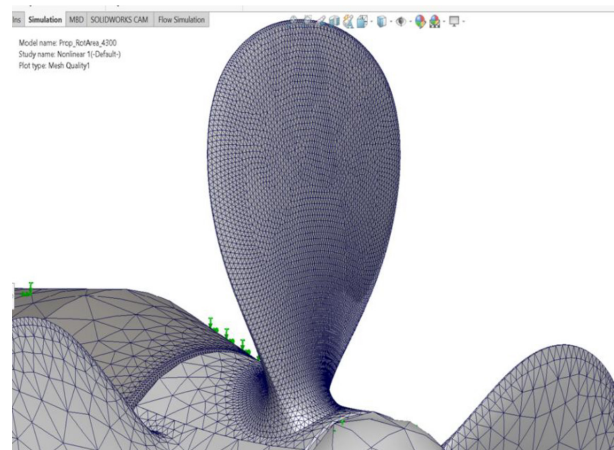


Рис. 11. Поліпшена сітка лопаті для визначення напружень

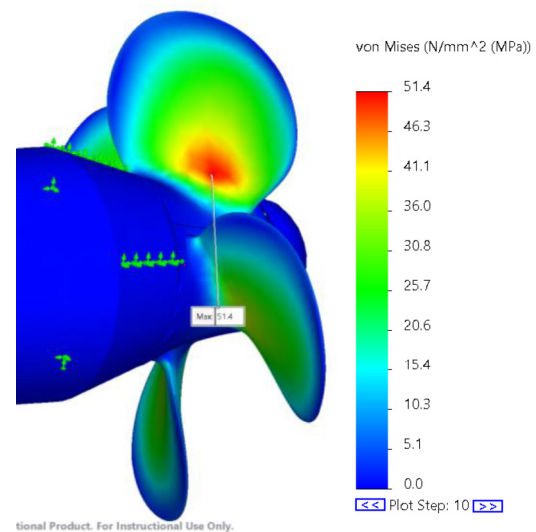


Рис. 12. Напруження за Мізесом для швидкості 0 вузлів

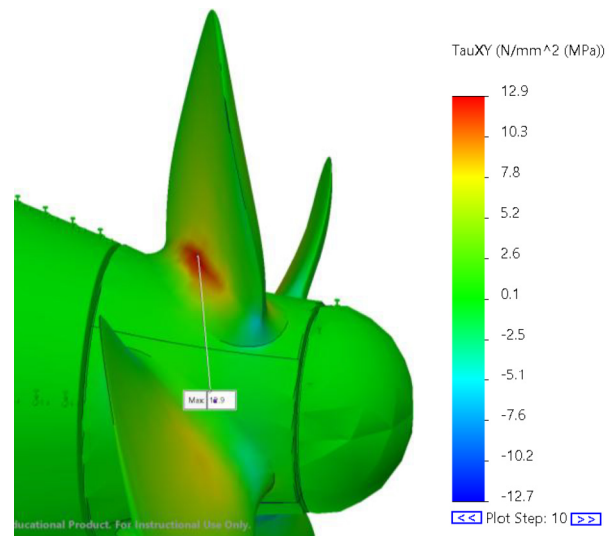


Рис. 13. Дотичних напруження XY для швидкості 0 вузлів

У таблиці 4 наведено дані для відкритої води, проте в реальних умовах гвинт працює за корпусом судна, де через пульсую-

Таблиця 4. Результати розрахунків максимальних напружень для гвинта у відкритій воді

V, вузлів	T, кН	Q, кН · м	K _T коэф. тяги	K _Q коэф. моменту	ККД, %	Напруження, МПа		
						За Мізесом	Дотичні XY	Дотичні YZ
0	954,6	499,3	0,214	0,050	0,0 %	51,4	12,9	12,2
2	851,1	447,0	0,192	0,045	12,1 %	46,5	14,3	11,9
4	823,8	432,7	0,186	0,043	24,2 %	45,9	12,5	16,1
6	725,5	391,2	0,168	0,039	35,3 %	37,3	12,9	10,2
8	635,9	349,0	0,150	0,035	46,3 %	31,7	11,5	8,5
10	531,8	306,0	0,131	0,031	55,1 %	25,4	8,9	6,2
12	432,8	261,5	0,112	0,026	63,0 %	20,5	6,4	4,9
14	335,4	216,2	0,093	0,022	68,9 %	16,1	4,9	3,6
16	238,5	175,2	0,075	0,017	69,1 %	12,1	3,7	3,5

чий потік навантаження на лопаті зростає на 20–50 % за один оберт. Для оцінки цього ефекту розглядаються режими на швидкості 14 вузлів і під час буксирування (4–8 вузлів).

Вплив корпусу, скега, гондоли та гвинта створює зону розрідження, що знижує ефективність на 10–20 % і підсилює динамічне навантаження. Повна модель з обертальною областю та локальним ущільненням сітки

поблизу гвинта (див. рис. 14 та 15) використовується для CFD-розрахунку аналогічно попередньому аналізу. Результати порівняння упору та моменту для швидкості 14 та 0 вузлів наведено в таблиці 5. Напруження за Мізесом на оберт гвинта в кореновому перерізі лопаті наведено на графіку рис. 16, де відстежується максимальне напруження $\sigma_{\max}$ та мінімальне напруження $\sigma_{\min}$ за цикл

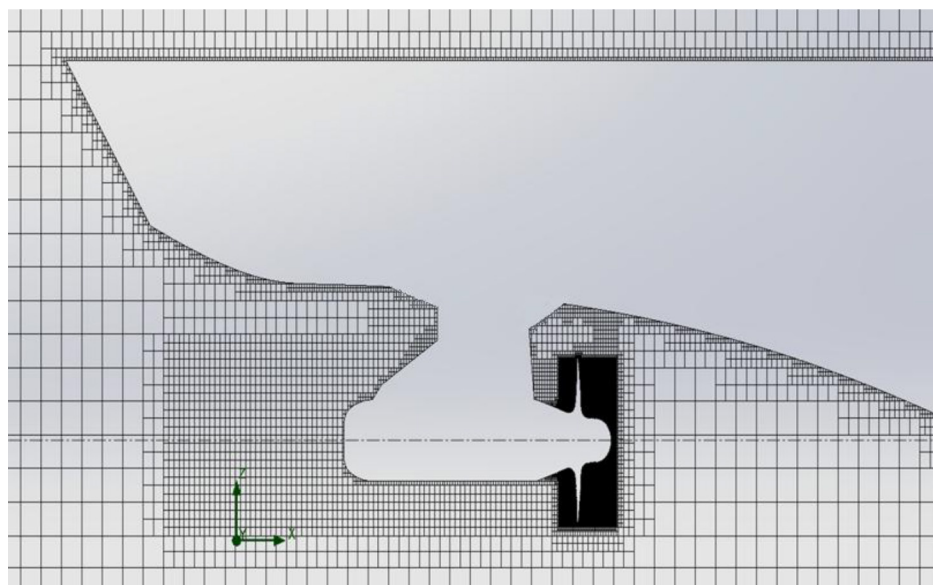
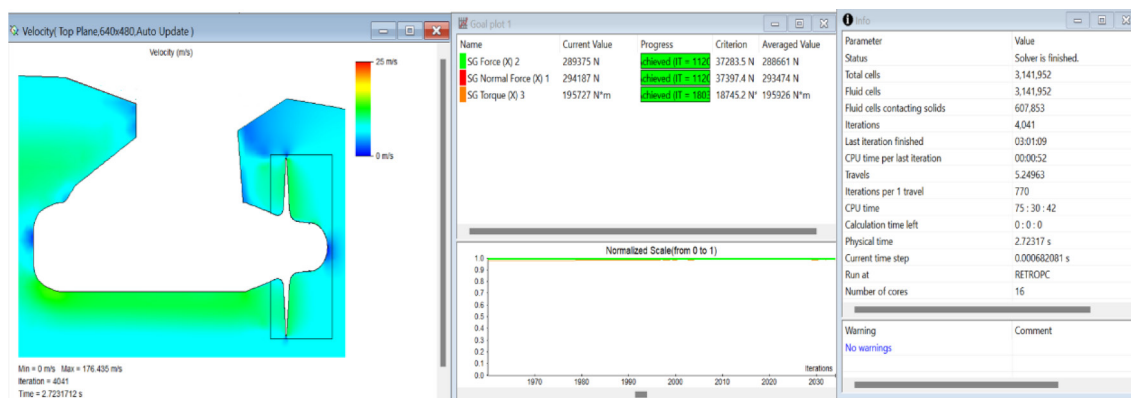


Рис. 14. Розбиття сітки комплексу гвинт – корпус судна

Рис. 15. Розрахунок комплексу гвинт – корпус судна для швидкості $V = 14$ вузлів

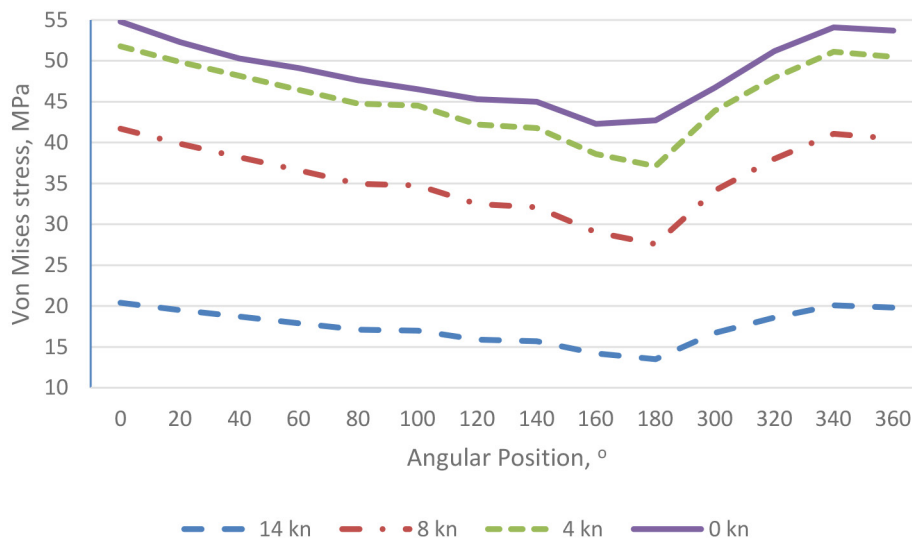


Рис. 16. Напруження за Мізесом на оберт гвинта в кореневому перерізі

оберту, яке пов'язане з розрідженим потоком поблизу корпусу судна.

Маючи динамічний розподіл напружень за один оберт під час роботи за корпусом судна (з урахуванням пульсацій), можна визначити коефіцієнти запасу міцності для критичних режимів експлуатації:

- коефіцієнт запасу статичної міцності за межею міцності:

$$SF_b = \frac{\sigma_b}{\sigma_m};$$

- коефіцієнт запасу статичної міцності за межею текучості (з урахуванням дії змінних напружень):

$$SF_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_m + \sigma_a};$$

де: σ_b – межа міцності матеріалу, МПа;

σ_s – межа текучості матеріалу, МПа;

$\sigma_m = 0,5(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$ – середнє напруження (стала складова), МПа;

$\sigma_a = 0,5(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$ – амплітуда напруження (змінна складова), МПа.

Для втомної міцності потрібно використовувати S/N-криві для матеріалу з відповідним коефіцієнтом асиметрії циклу ($R = -1$), які виконані за певних ненульових середніх напружень, та за правилом Мінера оцінювати кумулятивне пошкодження від втоми матеріалу:

$$D = \sum_i D_i = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq \left[SF_f \right],$$

де: $[SF_f]$ – коефіцієнт безпеки для циклічних навантажень;

n_i – необхідна кількість циклів для розглянутого циклічного навантаження;

N_i – кількість циклів, необхідних для відмови для розглядуваного циклічного навантаження за еквівалентного напруження за формулою Гербера

$$\sigma_{ae} = \frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b} \right)^2}.$$

Значення N_i будемо знаходити з песимістичного розвитку S/N діаграми

Таблиця 5. Результати порівняння упору та моменту

V, вузлів	Режим	T, кН	Q, кН · м	ККД
14	Відкрита вода	335,4	216,2	68,9 %
	За корпусом	288,6	195,9	65,3 %
	Відхилення	-14,0 %	-9,4 %	-3,6 %
0	Відкрита вода	954,6	499,3	0
	За корпусом	765	494	0
	Відхилення	-19,9 %	-1,1 %	–

Таблиця 6. Результати розрахунку коефіцієнтів запасу статичної міцності

V , узл	$\sigma_{\max}$, МПа	$\sigma_{\min}$, МПа	σ_m , МПа	σ_a , МПа	SF_b	SF_s
14	20,4	13,5	17,0	3,5	38,3	12,3
8	41,7	27,6	34,6	7,1	18,8	6,0
4	51,8	37,1	44,4	7,3	14,6	4,8
0	54,8	42,3	48,5	6,3	13,4	4,6

$\log(N_i) = 14 - 5 \cdot \log(\sigma_a)$ за ненульового середнього напруження. Результати розрахунків зведено до таблиць 6 та 7.

Розрахунок необхідних коефіцієнтів запасу міцності

Під час оцінки міцності лопатей гребного гвинта за статичних і циклічних навантажень важливо встановити допустимі напруження або коефіцієнти запасу. CFD-та FEM-моделювання дають змогу точно визначити напруження, проте не враховують повністю вплив технології виготовлення, масштабного ефекту, концентраторів та умов експлуатації.

Через складну геометрію лопатей і змінність навантажень точне визначення допустимих напружень є складним, тому доцільно застосовувати наближені методи з урахуванням реальних умов. Коефіцієнти запасу міцності $[SF_s]$ і втомної міцності $[SF_f]$ доцільно визначати як добуток часткових коефіцієнтів за методом І. А. Одінга.

$$[SF_s][SF_f] = S_1 \cdot S_2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot SC \cdot T_1 \cdot T_2,$$

де: $S = S_1 S_2$ – запас міцності:

S_1 – надійність матеріалу (1,1 для кованих, 1,3 для литих та 1,35 для друкованих деталей, оскільки недостатньо накопиченого досвіду, але характеристики матеріалу не гірші, ніж у разі лиття);

S_2 – рівень відповідальності конструкції (1,15...1,30, рекомендується 1,30 для гвинтів).

$C = C_1 C_2$ – конструктивні фактори:

C_1 – погрішності розрахунку з урахуванням можливого оголення гвинта та хитамиці (1,2 для статичного навантаження, 1,3 для циклічного);

C_2 – наявність концентраторів напружень (береться 1,0 для суцільної частини гвинта та потребує визначення за умов використання комірчастих структур, у подальшому буде використано 1,3).

SC – масштабний ефект:

1,1–1,15 для статичного навантаження;

1,0–1,5 для циклічного (через зниження межі витривалості зі збільшенням розмірів та товщини, аналогічно з коефіцієнтом корекції за товщиною, який пропонує DNV для гвинтів).

$T = T_1 T_2$ – технологічні фактори:

T_1 – якість поверхні (Для полірованих лопатей $T_1 \approx 1$. Для друкованих гвинтів з шорсткістю поверхні у комірках $T_1 \approx 1,1 - 1,3$, залежно від якості поверхні та матеріалу). Відома залежність $T_1 = 1 + \alpha |\sigma_{-1}|$, де α – коефіцієнт, залежний від чистоти поверхні (визначається експериментально), σ_{-1} – границя витривалості матеріалу за симетричного навантаження;

T_2 – остаточні напруження (зазначають 1,3 через складність повного їх усунення).

Як видно з таблиці 8, на необхідний рівень коефіцієнтів запасу для адитивно виготовлених гребних гвинтів найбільше впливають концентратори напружень і якість поверхні внутрішніх структур. Мінімізація їх впливу – ключове завдання під час проектування та вдосконалення технології WAAM.

Розраховані коефіцієнти слід вважати мінімально допустимими. Класифікаційні товариства висувають такі вимоги: Bureau Veritas встановлює мінімальний коефіцієнт запасу 8

Таблиця 7. Результати розрахунку коефіцієнту запасу втомної міцності

V , вузл	$\sigma_{\max}$, МПа	$\sigma_{\min}$, МПа	σ_m , МПа	σ_a , МПа	σ_{ac} , МПа	Δt , днів	n , об/хв	n_p , за 35 років	$\log(N_i)$	N_i	D_i
14	20,4	13,5	17,0	3,5	3,4	200	155	1,56E + 09	11,31	2,05E + 11	0,008
8	41,7	27,6	34,6	7,1	7,0	40	155	3,12E + 08	9,77	5,82E + 09	0,054
4	51,8	37,1	44,4	7,3	7,3	40	155	3,12E + 08	9,69	4,86E + 09	0,064
0	54,8	42,3	48,5	6,3	6,2	10	155	7,81E + 07	10,03	1,08E + 10	0,007
$\sum D$											0,133
$SF_f = 1/D_i$											7,529

Таблиця 8. Порівняння коефіцієнтів запасу отриманих для литих і адитивних гвинтів

Тип гвинта	Навантаження	S_1	S_2	C_1	C_2	SC	T_1	T_2	$ SF_s / SF_f $
Литий	Циклічне	1,3	1,3	1,3	1,0	1,1	1,05	1,3	3,30
Литий	Статичне	1,3	1,3	1,2	1,0	1,1	1,0	1,3	2,90
WAAM	Циклічне комірки	1,35	1,3	1,3	1,3	1,1	1,2	1,3	5,09
WAAM	Циклічне без комірок	1,35	1,3	1,3	1,0	1,1	1,05	1,3	3,43
WAAM	Статичне комірки	1,35	1,3	1,2	1,3	1,1	1,2	1,3	4,70
WAAM	Статичне без комірок	1,35	1,3	1,2	1,0	1,1	1,05	1,3	3,16

щодо границі міцності на розрив, а Lloyd's Register обмежує допустиме напруження до 56 МПа для нікель-алюмінієвої бронзи.

Частотний аналіз гребного гвинта. Модальний аналіз гребного гвинта проводиться для запобігання резонансним явищам під час експлуатації. Ключовим критерієм є за-

лучення 80–90 % маси лопаті (модель лопаті для розрахунку наведено на рис. 17) у перших модах коливань.

Окремо досліджується вплив води: через додаткову приєднану масу рідини власні частоти знижуються приблизно на 50 % порівняно з повітряним середовищем. Відповідні масові компоненти, які характеризують частку залученої маси лопаті за напрямками X , Y , Z , а також сумарне залучення маси, наведено в таблиці 9 (**червоним кольором** виділено найбільші значення масових компонентів, **зеленим** – найменші).

Гармоніки за участю значних мас перевищують робочий діапазон частот (± 15 % від збуджувальних), а саме:

- обертання гвинта (2,58 Гц),
- лопатева частота (10,32 Гц),
- вихровий слід від кронштейна (10,32 Гц),
- робота двигуна (16,6 Гц).

Однак у разі використання комірчастих лопатей зменшення маси та жорсткості

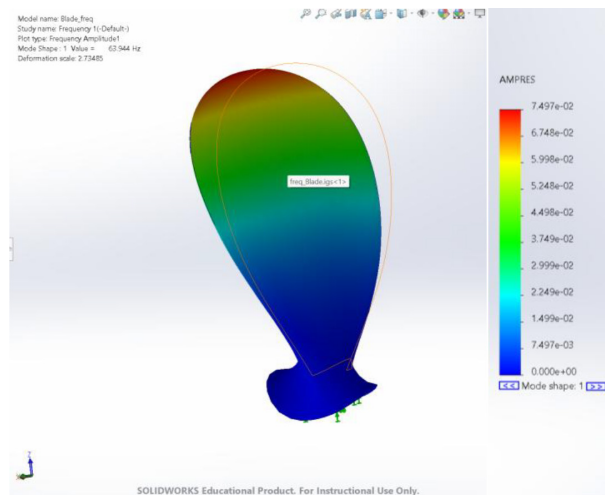


Рис. 17. Модель лопаті для розрахунку власних частот

Таблиця 9. Власні частоти лопаті в повітрі та воді

No.	Air	Water	X direction mass	Y direction mass	Z direction mass
	Freq (Гц)	Freq (Гц)			
1	63,94	35,17	0,2992	0,1147	0,0000
2	159,22	87,57	0,0423	0,0421	0,0005
3	237,79	130,78	0,0120	0,2905	0,0001
4	291,94	160,57	0,0935	0,0229	0,0019
5	320,47	176,26	0,1357	0,0566	0,0040
6	430,97	237,03	0,0267	0,0044	0,0016
7	578,79	318,33	0,0420	0,0164	0,0127
8	690,67	379,87	0,0034	0,0029	0,0313
9	735,5	404,53	0,0034	0,0002	0,5819
10	792,56	435,91	0,0047	0,0083	0,0163
11	878,8	483,34	0,0204	0,1324	0,0000
12	902,31	496,27	0,0126	0,0678	0,0000
13	971,72	534,45	0,0218	0,0010	0,0005
14	1,058,60	582,23	0,0285	0,0001	0,0002
15	1,252,20	688,71	0,0007	0,0001	0,0152
16	1,414,60	778,03	0,0031	0,0006	0,0418
17	1,439,90	791,95	0,0073	0,0012	0,0245
18	1,544,10	849,26	0,0102	0,0026	0,0002
			$\sum X = 0,79$	$\sum Y = 0,80$	$\sum Z = 0,75$

може призвести до резонансу, тому потрібен окремий аналіз на виключення небезпечних коливань.

Обговорення отриманих результатів.

Комплексний аналіз напружено-деформованого стану лопатей гвинта підтвердив ефективність інтегрованого підходу CFD – FEM для оцінки навантажень у різних режимах. Порівняння традиційної литої та WAAM-конструкції виявило низку особливостей, зокрема анізотропію властивостей, що ускладнює застосування ізотропних критеріїв, як-от Мізеса, і потребує використання моделей типу Мізеса – Хілла.

Також зростає чутливість до вибору коефіцієнтів запасу, які мають враховувати мікроструктурну неоднорідність, залишкові напруження та можливі дефекти. Тому під час проєктування WAAM-гвинтів слід адаптувати критерії міцності й уточнювати параметри на основі нормативної та експериментальної верифікації.

Особливу увагу варто приділити інтеграції комірчастих структур: у зоні 0,2–0,3R, де зосереджені максимальні навантаження, їх застосування недоцільне через ризик втрати профілю й ефективності. Натомість у діапазоні 0,4–0,9R можлива оптимізація маси та жорсткості завдяки використанню градієнтних структур.

Висновки. Представлена робота формує основу для вдосконалення підходів до

забезпечення міцності й надійності гребних гвинтів, виготовлених за технологією WAAM з інтеграцією комірчастих структур. Адитивне виробництво з використанням NAB і процесу СМТ демонструє значні переваги перед литими аналогами, зокрема щодо механічних властивостей, проте супроводжується викликами – анізотропією, залишковими напруженнями та необхідністю післяобробки.

Порівняльний аналіз показав, що для адитивних гвинтів потрібне підвищення коефіцієнтів запасу, особливо за циклічних навантажень. Комірчасті структури доцільно впроваджувати лише в зонах із меншими навантаженнями (0,4–0,9R), тоді як кореневі ділянки (0,2–0,3R) мають залишатися суцільними. Ураховуючи зниження жорсткості та зміну динамічних характеристик, рекомендовано проводити модальний аналіз для виключення резонансів.

Подальші дослідження мають охоплювати поведінку таких конструкцій за експлуатаційних і аварійних навантажень, зокрема за ударних впливів. Ключовим залишається також експериментальна верифікація числових моделей і вдосконалення нормативної бази. Загалом WAAM-гвинти з комірчастими структурами мають значний потенціал, проте їх впровадження потребує комплексного підходу до розрахунків, матеріалознавства й випробувань.

Список літератури

- [1] Zhang Z., Yan J., Lu X., Zhang T., & Wang H. Optimization of porosity and surface roughness of CMT-P wire arc additive manufacturing of AA2024 using response surface methodology and NSGA-II. Civil Aviation University of China, Tianjin University of Technology and Education.
- [2] Orzolek S. M., Semple J. K., & Fisher C. R. Nickel-Aluminum Bronze (NAB) Review: Additive Manufacturing and Weldability. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. P. 29–30.
- [3] Kim J., Kim J., & Pyo C. Comparison of Mechanical Properties of Ni-Al-Bronze Alloy Fabricated through WAAM with Cast Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020.
- [4] Roshan M., Mahtabi M.B., Ranjbar Eslamlou S., Behvar A., & Haghshenas M. Review on Fatigue Characteristics of NAB: Conventional and Additive Methods. *University of Toledo, USA*, 2024.
- [5] Bureau Veritas. *Rules on Materials and Welding for Classification of Marine Units* (NR216). 2025.
- [6] Bercelli L., Moyne S., Dhondt M., Doudard C., Calloch S., & Beaudet J. Probabilistic Approach for HCF of WAAM Parts Considering Process-Induced Pores. *Additive Manufacturing*. 2021. Vol. 42. P. 101989.
- [7] Shakil S. I., Shakerin S., Rahmdel K., et al. Fatigue Response of WAAM NAB in Post-Annealed Condition. *International Journal of Fatigue*. 2024. P. 108472.

- [8] Dharmendra C., Amirkhiz B. S., Lloyd A., Ram G. D. J., & Mohammadi M. WAAM NAB with Enhanced Mechanical Properties via Heat Treatments. *Manufacturing*. 2020. Vol. 36. P. 101510.
- [9] Shen C., Mu G., Hua X., Li F., Luo D., Ji X., & Zhang C. Influences of Heat Treatments on Anisotropy of WAAM-Fabricated NAB. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019.
- [10] RAMLAB. *RAMLAB unveils world's first class-approved 3D printed ship's propeller*. 2017. Retrieved from <https://www.ramlab.com/updates/ramlab-unveils-worlds-first-class-approved-3d-printed-ships-propeller>
- [11] RAMLAB. *RAMLAB and Huisman initiate consortium to produce world's heaviest 3D printed steel crane hook*. 2018. Retrieved from <https://www.ramlab.com/updates/ramlab-huisman-initiate-consortium-produce-worlds-heaviest-3d-printed-steel-crane-hook>
- [12] Huisman Equipment. *Huisman scales up 3D printing of crane hooks*. 2018. Retrieved from https://www.huismanequipment.com/en/media_centre/_press_releases/163-155_Huisman-scales-up-3D-printing-of-crane-hooks
- [13] Taylor D. W. *The Speed and Power of Ships: A Manual of Marine Propulsion*. Washington, DC: Government Printing Office, 1893.
- [14] Mackenzie C. Naval Group prints first propeller for powering French warship. *Defense News*. 2021, January 13. Retrieved from <https://www.defensenews.com/global/europe/2021/01/13/naval-group-prints-first-propeller-for-powering-french-warship/>
- [15] Valpolini P. Naval Group and Centrale Nantes: the world's first hollow propeller blade. *EDR Magazine*. 2019, February 7. Retrieved from <https://www.edrmagazine.eu/naval-group-and-centrale-nantes-the-worlds-first-hollow-propeller-blade>
- [16] Nota C., Rückert G., Heuzé J. L., Carlino L., Quenez J. M., & Courregelongue L. A first feedback on manufacturing and inservice behaviour of a WAAMmade propeller for naval application. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023.
- [17] Ya W. & Hamilton K. On-Demand Spare Parts for the Marine Industry with Directed Energy Deposition: Propeller Use Case. *Journal of Marine Engineering and Technology*. 2023.
- [18] Queguineur A., Rückert G., Cortial F., & Hascoët J.Y. Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017.
- [19] Klötzer-Freese C., Kruse T., Khalil M., & Greitsch L. Hybrid manufacturing of a hollow ship's propeller – investigation from material characterization to implementation. *Mecklenburger Metallguss GmbH*, Waren, Germany, 2024.

© Манько В. В.

Дата надходження статті до редакції: 30.04.2025

Дата затвердження статті до друку: 25.05.2025

Дата публікації статті: 04.11.2025

