

ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 30, 2022, № 2 (329), 96-102

<https://doi.org/10.15407/steelcast2019.10.064>

УДК 621.74

В.С. Бондаренко¹, начальник металургійного відділу – головний металург, e-mail: v.bondarenko@ukrenergymachines.com

О.М. Безвесільна¹, заступник начальника металургійного відділу, e-mail: e.bezvesilnay@ukrenergymachines.com

О.І. Пономаренко², д-р техн. наук, проф., проф. кафедри, e-mail: 21ponomarenko@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-3043-4497>

О.С. Бударін¹, заступник генерального директора, e-mail: budarin@ukrenergymachines.com

А.П. Марченко², д-р техн. наук, проф., проректор з наукової роботи, e-mail: Andrii.Marchenko@khpi.edu.ua,
<https://orcid.org/0000-0001-9746-4634>

О.В. Акімов², д-р техн. наук, проф., зав. кафедри, e-mail: Oleg.Akimov@khpi.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7583-9976>

С.В. Артьомова¹, начальник центральної заводської лабораторії, e-mail: artemova@ukrenergymachines.com,
<https://orcid.org/0000-0003-2075-5518>

В.П. Михайлюков¹, начальник цеху лиття та поковок, e-mail: Vov63.4ik@gmail.com

С.Д. Євтушенко², магістрант, e-mail: stepanco.00@ukr.net

¹Акціонерне товариство «Українські енергетичні машини» (АТ «УЕМ») (Харків, Україна)

²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)

Інноваційна технологія виготовлення виливка лопаті робочого колеса радіально-осьової гідротурбіни

Метою дослідження роботи є розробка прогресивної технології виливка лопаті робочого колеса гідротурбіни Дністровської гідроакумулювальної електростанції (ГАЕС).

Для вирішення задачі підвищення якості виливків використовувалися комп'ютерно-інтегровані методи моделювання процесів лиття. Використання CAD/CAE програм дозволило значно скоротити час на розробку технологічних процесів, створити умови для спрямованого затвердіння виливків, розрахувати оптимальну величину надливу, і за рахунок прогнозування появи місць дислокації дефектів, зменшити брак виливків.

Виготовлення цільнолиті лопаті робочого колеса з нержавіючої сталі СА-6NM стало можливим після реконструкції металургійного виробництва АТ «УЕМ» та капітального ремонту електродугової печі.

Структурна стабільність, стабільність фізико-механічних властивостей при виробництві сталі СА-6NM досягається за рахунок отримання заданого співвідношення хромового та нікелевого еквівалента та використанням комп'ютерного керування складом сталі при виплавці. Виплавка нержавіючої сталі велася у двох електродугових сталеплавильних печах з основним футеруванням. Після випуску метал продувався через щілинні фурми в ковшах аргонном.

Формоутворювальне оснащення було представлено складним об'ємним модельним комплектом. Були виготовлені просторові шаблони, стрижневі ящики та модельний знак. При виготовленні стрижнів застосовувалися каркаси складної конструкції та формувальні холоднотвердіючі суміші на хромітових пісках за фуран-процесом. При виготовленні стрижнів для надливних частин використовувалися екзотермічні матеріали.

Зниження вартості виливків лопатей від переведення зі зварно-литого варіанта на цільно-литий та організацію їх виробництва в умовах ливарного цеху АТ «УЕМ» склало 30 %.

Ключові слова: лопать, лита деталь, LVM Flow, SolidWorks, комп'ютерне проектування, спрямоване твердіння, хромітовий пісок, фуран-процес, якість.

Вступ. Найважливішою галуззю економіки України, що свідчить про рівень розвитку, є енергетика. Енергетика розвивається у багатьох напрямках та один з основних напрямків – створення потужних, економічних та надійних турбін. Акціонерне товариство «Українські енергетичні машини» виготовляє парові турбіни, що працюють на органічному та ядерному паливі, а також гідралічні, що працюють на різних річках, водосховищах з різним рівнем перепаду води та різної потужності.

Одна з найпотужніших у світі оборотних гідротурбін виробництва АТ «Українські енергетичні машини» встановлена на Дністровській ГАЕС (Україна) з потужністю гідроагрегату 324 МВт у генераторному режимі та 421 МВт у руховому насосному режимі.

Оборотна гідротурбіна працює як турбіна і як насос. У нічний період, коли в енергосистемі є надлишок потужності, агрегати працюють у насосному режимі, перекачуючи воду з нижньої водойми у верхню, а в період максимуму навантаження у вечірній пік вони працюють у турбінному режимі, видаючи електроенергію в енергосистему.

Головним робочим органом турбіни, у якому відбувається перетворення енергії, є робоче колесо. Робоче колесо – зварна конструкція, є просторовою системою, що складається з верхнього фланця (ступиці), нижнього обода і лопатей (рис. 1).

Окремо відлиті зі сталі лопаті, обід і ступиця зварюються між собою електрозварюванням з подальшим термічним обробленням. Така конструкція робочого колеса спрощує технологічний процес отримання виливків і дозволяє більш точно відлити та обробити лопаті, обід та ступицю. Крім того, роздільне виготовлення виливків дає можливість при складанні встановити лопаті точніше, ніж при виготовленні цільнолитого колеса, що позитивно позначається на його гідралічних якостях.

До лопат гідралічних турбін пред'являються підвищені вимоги при їх виготовленні та експлуатації. Лопаті робочих коліс гідротурбін є однією з відповідальних деталей, бо вони сприймають тиск потоку води і створюють обертаючий момент в робочому колесі. Найбільш відповідальною частиною лопаті є перо (профільна частина), оскільки воно безпосередньо

сприймає всі навантаження падаючого потоку води; в процесі експлуатації.

Лопаті мають складну конфігурацію і виконуються з тонких просторових елементів, які мають змінну жорсткість по довжині. З'єднання лопат зі ступицю і ободом відбувається за кривими, що не лежать у радіальних площинах.

Лопаті схильні до значних статичних і динамічних навантажень, що викликають в матеріалі лопаті складні напруги вигину, а також вони зазнають вібрації пульсуючого потоку рідини [1–3].

Раніше для виготовлення робочого колеса гідротурбіни Дністровської ГАЕС використовувалися лопаті, виготовлені у зварнолитому варіанті. Конструкція лопаті складалася з трьох окремо виготовлених заготовок, які потім зварювалися між собою. Цей варіант виготовлення лопатей відрізнявся дорожнечою при виготовленні, тому що лопаті отримували з іншого підприємства за договором імпортозаміщення.

Метою дослідження є розробка інноваційної технології виливка цільнолитого лопаті робочого колеса гідротурбіни Дністровської ГАЕС.

Виготовлення цільнолитого лопаті робочого колеса стало можливим після реконструкції металургійного виробництва АТ «УЕМ» та капітального ремонту електродугової печі.

Вибір технології виготовлення відповідальних деталей завжди є складним завданням. Вибір технології лиття визначається обсягом та характером виробництва, вимогами до виливків за точністю та шорсткістю поверхні, технологічними особливостями та фізико-хімічними властивостями застосовуваних ливарних сплавів, вимогами якості до виливків, виходячи з економічної доцільності застосування того чи іншого способу лиття для кожного конкретного випадку та можливостей виробництва [4, 5].

Необхідно розробити технологію цільнолитого лопаті виготовлення робочого колеса радіально-осьової турбіни. Діаметр робочого колеса турбіни Дністровської ГАЕС становить 7,3 м. Робоче колесо складається з ступиці, обода та 7 радіально-осьових цільнолитих лопатей.

Лопать робочого колеса має складну просторову форму, що властива лопатевим системам оборотних радіально-осьових насос-турбін. Форма лопаті, напірна і всмоктуючої кромки, її S-подібний профіль великої протяжності так само характерні для типу насосів. Лопать має складну конфігурацію, у зв'язку з чим зазнає дії складних систем навантажень. Напірна кромка розташовується радіально і є вхідною кромкою лопатевої системи в турбінному режимі. Відповідно всмоктувальна кромка є вхідною в насосному режимі роботи.

У лопаті є характерний вигин, змінний переріз товщин, вхідний та вихідний крайок – від 15 мм до 100 мм, різниця між вхідною кромкою лопаті та вихідною кромкою становить близько одного метра. Чиста вага деталі лопаті – 4800 кг. Чорна вага виливка – 8500 кг. Фотографія обробленої лопаті турбіни та фрагменти профілю виливка лопаті представлено на рис. 2 і рис. 3.



Рис. 1. Робоче колесо гідротурбіни



Рис. 2. Фотографія обробленого виливка лопаті турбіни

Матеріал для лопатей гідротурбін повинен відповідати таким вимогам [1, 2]:

- високі механічні властивості та рівномірність їх по перерізу;
- стійкість до кавітаційної ерозії;
- однорідність мікроструктури;
- високі ливарні та технологічні властивості, зварюваність та ін.

Литі робочі колеса радіально-осьових гідротурбін здебільшого виготовляються з нержавіючих марок сталей 06X12H3ДЛ або СА-6NM. Однак сталь СА-6NM має більш високу роботу удару та більш оптимальне поєднання роботи удару та характеристик міцності для забезпечення технологічної та експлуатаційної тріщиностійкості порівняно зі сталлю 06X12H3ДЛ. При однаковому вмісті хрому в цих сталях, сталь СА-6NM відрізняється від сталі 06X12H3ДЛ більш високим вмістом нікелю, наявністю молібдену, відсутністю міді, а також ширшим діапазоном легуючих елементів і домішок, за винятком вуглецю. Структурна стабільність, стабільність фізико-механічних властивостей при виробництві сталі СА-6NM досягається за рахунок отримання заданого співвідношення хромового та нікелевого еквівалента та використанням комп'ютерного керування складом сталі при виплавці.

Хімічний склад виливка лопаті робочого колеса з нержавіючої корозійностійкої сталі СА6-NM повинен відповідати вимогам ASTM A743/A743M-98a і наведений в таблиці.

Одним з головних етапів виготовлення виробу є спосіб виготовлення виливка і оцінка можливості виготовлення на наявному обладнанні.

Створення 3D моделі виробу відбувається за допомогою CAD пакетів різного рівня, які безконфліктно працюють в середовищі PDM системи [10, 11]. Надалі 3D модель є основою для різних конструкційних розрахунків з експлуатаційними навантаженнями. Потім на її основі створюється 3D модель виливка. Для

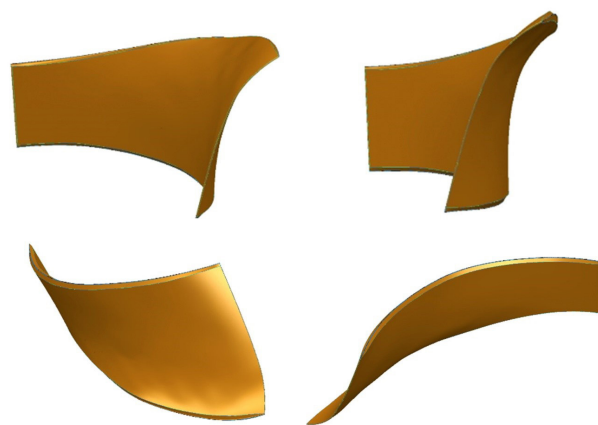


Рис. 3. Фрагменти профілю виливка лопаті

отримання якісного виливка без дефектів було використано пакети комп'ютерно-інтегрованого проектування для моделювання процесу заповнення форми розплавом та охолодження виливка, виявлення місць дислокації внутрішніх дефектів.

Далі проводиться моделювання технологічного процесу виробництва литої деталі за допомогою CAE систем різного рівня, призначених для даного роду розрахунків. Після аналізу отриманих результатів моделювання вносяться зміни, в 3D моделі деталі і виливка. Причому, при внесенні деяких поправок в 3D моделі деталі, таких як дислоковані ливарні дефекти, виробляються повторні конструкційні розрахунки з експлуатаційними навантаженнями, з подальшим внесенням поправок в конструкцію деталі.

Отримання якісних виливків можливе за рахунок використання нових методів та програмних продуктів, таких як SolidWorks та LVMFlow [10, 11]. Такий підхід до проектування дозволяє одночасно пов'язувати такі параметри, як оптимальна конструкція деталі, технологічність її виготовлення, а також закладати ці параметри на етапі підготовки виробництва, скорочуючи при цьому час на їх проектування.

Таким чином, за допомогою програм CAD\CAE було створено тривимірну модель виливка та опрацьовано ливарну технологію її заливки з урахуванням рівномірного заповнення форми металом та отримання виливка високої якості.

Основними операціями технологічного процесу отримання виливка лопаті є:

- виготовлення модельного комплекту;
- виготовлення спеціальної оснастки;
- виготовлення форми із застосуванням сучасних матеріалів;
- фарбування форми протипригарним покриттям;
- виплавка сталі в дугових сталеплавильних печах;
- заливання форми з двох ковшів;

Хімічний аналіз сталі СА6-NM за ASTM A743/A743M-98a

С (%) макс.	Si (%) макс.	Mn (%) макс.	P (%) макс.	S (%) макс.	Cr (%)	Ni (%)	Cu (%)	Mo (%)	Al (%)
0,06	1,00	1,00	0,04	0,03	11,5–14,0	3,5–4,5	Відсутн.	0,40–0,0	Відсутн.



Рис. 4. Стрижневий ящик з використанням каркасів

- витримка ливарної форми;
- розбирання ливарної форми;
- очищення виливка;
- відрізка надливів на виливку;
- термообробка виливка.

Формоутворювальне оснащення було представлено складним об'ємним модельним комплектом. Були виготовлені просторові шаблони, які виконували S-образність профілю, характерний вигин, змінний переріз робочої та неробочої поверхні лопаті по довжині, стрижневі ящики та модельний знак. У стрижневих ящиках були передбачені ухили, припуски на механічну обробку та на усадку при затвердінні та охолодженні металу, напуски для спрямованої кристалізації металу у формі.

На якість виливків великий вплив мають формувальні суміші, властивості яких залежать від вихідних матеріалів [12–14]. Наповнювачі повинні бути інертними до розплавленого металу, мати відносно високу термічну стійкість, механічну міцність, вогнетривкість, низький коефіцієнт термічного розширення, однорідний зерновий склад та мінімальну вартість.

В умовах АТ «Українські енергетичні машини» для отримання виливка лопаті застосовуються високовогнетривкі та хімічно інертні хромітові піски [15]. Хромітовий пісок має високу міцність при термічному ударі і не має алотропічних перетворень при 575 °С. Також він інертний до оксидів заліза за високих температур у різних газових атмосферах і погано змочується рідким металом, що запобігає утворенню пригару та покращує умови кристалізації металу. Крім того, він має високу теплоакумулюючу здатність та теплопровідність.

При виготовленні стрижнів застосовувалися каркаси складної конструкції та формувальні холодно-твердіючі суміші за фуран-процесом двох видів. Облицювальна формувальна суміш на основі хромітового піску складалася з 90 % регенованого хромітового піску, 10 % свіжого хромітового піску та сполучних речовин. Наповнююча формувальна суміш на основі кварцового піску складалася з 90 % регенованого кварцового піску, 10 % свіжого кварцового піску та сполучних речовин. Формування із за-

стосуванням холодно-твердіючих сумішей (ХТС) дало необхідну механічну міцність ливарної форми, за рахунок ефективного процесу полімеризації, і однорідність ущільнення. Фотографію стрижневого ящика з використанням каркасів наведено на рис. 4.

При виготовленні стрижнів для надливних частин використовувалися екзотермічні матеріали, що забезпечують підігрів надливу та контроль усадки металу у процесі його охолодження та затвердіння.

Число додатків, необхідних для живлення виливка лопаті, визначали залежно від протяжності вузла живлення (загальної довжини виливка 5000 мм). Для виготовлення лопаті необхідно встановити три надливи.

Для встановлення стрижнів в єдину форму в спеціальній опоці був заформований модельний знак і прокладена ливникова система з горизонтальними живильниками для заливки металом.

Для створення якісної поверхні виливка та запобігання виникненню дефектів у виливку проводилося фарбування поверхонь форми протипригарною фарбою на основі корунду. Складання форми було проведено в універсальне оснащення із застосуванням зовнішніх та внутрішніх холодильників.

Виплавка нержавіючої сталі велася у двох електродугових сталеплавильних печах з основним футеруванням. Після випуску метал продувався через щільні фурми в ковшах аргонном і витримувався на початок розливу.

Заливання форми полягало в тому, що ковші з плавильної ділянки по передавальному візку передавалися на ділянку формування по черзі з інтервалом у кілька хвилин. Оскільки маса рідкого металу складала 16000 кг, то заливку виливка виробляли одночасно двома ковшами, місткість кожного – 8000 кг. При встановленні двох ковшів на заливальні ливникові чаші пуск металу у форму подавався з урахуванням рівномірного заповнення форми. Тривалість процесів кристалізації, охолодження металу у формі була встановлена у 7,5 діб. Форма була розкрита за температури 200 °С.

Видалення надливів та елементів ливникової системи було виконано газокисневою різкою.

Термічна обробка виливка виконувалася на спеціальному пристрої в газовій печі. Режим термічної обробки лопатей гідротурбіни складається з нагріву до 1030–1040 °С з наступним інтенсивним охолодженням на повітрі зі швидкістю не менше 400 °С/год і високим відпуском при температурі 580–590 °С [16]. Це забезпечує необхідний рівень механічних властивостей масивних складнопрофільних литих лопатей гідротурбіни: $\sigma_b \geq 650$ МПа, $\sigma_{0.2} \geq 820$ МПа, $\delta \geq 15$ %, $\psi \geq 35$ %, KCU ≥ 50 Дж/см², 255...300 НВ, KV ≥ 30 Дж при -10 °С факультативно.

Зниження вартості виливків лопатей від переведення зі зварно-литого варіанта на цільно-литий та організацію їх виробництва в умовах ливарного цеху АТ «УЕМ» склало 30 %.

Висновки

1. Випуск виробів для потреб турбобудування в даний час неможливий без істотного підвищення складності, якості, експлуатаційних властивостей деталей, точності і зменшення стінок литих заготовок.
2. При використанні програмних продуктів CAD\CAE технологи і конструктори отримують новий інструмент для проектування і отримання якісних виливків. Програми CAD\CAE відкривають нові можливості в проектуванні технології приготування відливання і в конструюванні оснащення. За допомогою даних програм можна наочно вивчити процес заливки форми металом, процес охолодження виливка, визначити місця дислокації дефектів. Вони дають можливість прискорити випуск нових виробів, скоротити витрати виробництва заміною фізичних макетів віртуальними, економити за рахунок багаторазового використання проектних даних, розширити можливості оптимізації виробів, знизити витрати за рахунок повної інтеграції інженерного документообігу.
3. Виготовлення цільнолитой лопаті робочого колеса стало можливим після реконструкції металургійного виробництва АТ «УЕМ» та капітального ремонту електродугової печі.
4. Литі робочі колеса радіально-осьових гідротурбін виготовляють з нержавіючої сталі СА-6NM. Структурна стабільність, стабільність фізико-механічних властивостей при виробництві сталі СА-6NM досягається за рахунок отримання заданого співвідношення хромового та нікелевого еквівалента та використанням комп'ютерного керування складом сталі при виплавці.

5. Формоутворювальне оснащення було представлено складним об'ємним модельним комплектом. Були виготовлені просторові шаблони, які виконували S-образність профілю, характерний вигин, змінний переріз робочої та неробочої поверхні лопаті по довжині, стрижневі ящики та модельний знак.

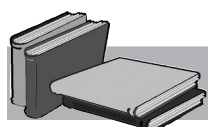
6. При виготовленні стрижнів застосовувалися каркаси складної конструкції та формувальні холодно-твердіючі суміші на хромітових пісках за фуран-процесом двох видів. Формування із застосуванням холодно-твердіючих сумішей (ХТС) дало необхідну механічну міцність ливарної форми, за рахунок ефективного процесу полімеризації і однорідності ущільнення.

7. При виготовленні стрижнів для надливних частин використовувалися екзотермічні матеріали, що забезпечують підігрів надливу та контроль усадки металу у процесі його охолодження та затвердіння.

8. Виплавка нержавіючої сталі велася у двох електродугових сталеплавильних печах з основним футеруванням. Після випуску метал продувався через щільні фурми в ковшах аргонном.

9. Заливку виливка виробляли одночасно двома ковшами, місткість кожного – 8000 кг. При встановленні двох ковшів на заливальні ливникові чаші пуск металу у форму подавався з урахуванням рівномірного заповнення форми. Тривалість процесів кристалізації, охолодження металу у формі була встановлена у 7,5 діб. Форма була розкрита за температури 200 °С.

10. Зниження вартості виливків лопатей від переведення зі зварно-литого варіанта на цільно-литий та організацію їх виробництва в умовах ливарного цеху АТ «УЕМ» склало 30 %.

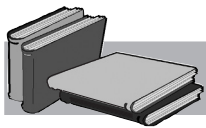


ЛІТЕРАТУРА

1. Георгиевская Е.В. Энергетический подход к оценке динамических напряжений в гидротурбинах. *Материаловедение. Энергетика*. 2017. Т. 23. № 4. С. 89–97.
2. Бабаченко Ю.В., Авдюшенко А.Ю. Расчетное исследование радиальных сил, действующих на ротор радиально-осевой гидротурбины. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2013. № 4. С. 547–551.
3. Лобарева И.Ф., Черный С.Г., Чирков Д.В., Скороспелов В.А., Турук П.А. Многоцелевая оптимизация формы лопасти гидротурбины. *ЖВТ*. 2006. Т. 11. № 5. С. 63–76.
4. Пономаренко О.И. Оптимизация технологических решений в условиях работы литейных цехов. Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. 320 с.
5. Пономаренко О.И., Лысенко Т.В., Становский А.Л., Шинский О.И. Управление литейными системами и процессами. Монография. Харьков: Підручник НТУ «ХПИ», 2012. 368 с.
6. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение и кавитационностойкие сплавы. Москва: Металлургия, 1972. 192 с.
7. Тарасов В.Н. Физические механизмы кавитационной эрозии. *Техническая акустика*. 2015. № 3. С. 2–10.
8. Никаноров А.В. Сравнительный анализ компьютерных программ для моделирования литейных процессов. *iPolytech Journal*. 2018. Т. 22. № 11. С. 209–218. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-209-218>
9. Алехин В.И., Белогуб А.В., Марченко А.П., Акимов О.В. Компьютерно-интегрированное моделирование литейных процессов в автомобильных поршнях на основе конструкторско-технологической методики проектирования деталей ДВС. *Научно-технический журнал «Двигатели внутреннего сгорания»*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2009. № 2. С. 101–104.
10. Пономаренко О.И., Косенко О.П., Щвец М.В., Евтушенко С.Д. Применение компьютерно-интегрированного проектирования для нетехнологичных отливок шахтного оборудования. *Металл и литье Украины*. 2019. № 3–4 (310–311). С. 18–24.

11. Akimov O., Kostyk K., Klymenko S., Penzev P., Saltykov L. Ensuring the Technological Parameters of Cast Block Crankcase of Automobile's Diesel Engine. In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (Eds.) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_1
12. Болдин А.Н., Давыдов Н.И., Жуковский С.С. и др. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: Справочник. Москва: Машиностроение, 2006. 507 с.
13. Голофаев А.Н., Лагута В.И., Хинчаков Г.В. Технология литейной формы. Луганск: Издательство ВЛУ, 2001. 264 с.
14. Лютий Р.В., Гурія І.М. Формувальні матеріали: підручник для студ. спеціальності 136 «Металургія», освітньої програми «Комп'ютеризовані процеси лиття». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 258 с.
15. Берлизова Т.В., Пономаренко О.И., Качанова Н.А. Моделирование свойств ХТС на основе хромитового песка и циклокарбонатов. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2015. № 1 (39). С. 48–51.
16. Артьомова С.В., Бударін О.С., Бондаренко В.С., Безвесільна О.М., Пономаренко О.І., Марченко А.П., Акімов О.В., Михайлюков В.П. Термічна обробка і властивості литої складнопрофільної лопаті гідротурбіни. *Металознавство та обробка металів*. 2022. Т. 28 (102). № 2. С. 58–63. DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2022.02.058>

Надійшла 27.06.2022



REFERENCES

1. Georgievskaya, Ye.V. (2017). Energy approach to the assessment of dynamic stresses in hydraulic turbines. *Materialovedenie. Energy*, vol. 23, no. 4, pp. 89–97 [in Russian].
2. Babachenko, Yu.V., Avdyushenko, A.Yu. (2013). Calculation study of radial forces acting on the rotor of a radial-axial hydroturbine. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, no. 4, pp. 547–551 [in Russian].
3. Lobareva, I.F., Chernyi, S.G., Chirkov, D.V., Skorospelov, V.A., Turuk, P.A. (2006). Multi-purpose optimization of the blade shape of a hydroturbine. *ZhVT*, vol. 11, no. 5, pp. 63–76 [in Russian].
4. Ponomarenko, O.I. (2007). Optimization of technological solutions in the conditions of work of foundries. Kharkiv: NTU "KhPI", 320 p. [in Russian].
5. Ponomarenko, O.I., Lysenko, T.V., Stanovsky, A.L., Shinsky, O.I. (2012). Management of foundry systems and processes. Monograph. Kharkiv: Assistant NTU "KhPI", 368 p. [in Russian].
6. Bogachev, I.N. (1972). Cavitation destruction and cavitation-resistant alloys. Moscow: Metallurgiya, 192 p. [in Russian].
7. Tarasov, V.N. (2015). Physical mechanisms of cavitation erosion. *Technical acoustics*, no. 3, pp. 2–10 [in Russian].
8. Nikanorov, A.V. (2018). Comparative analysis of computer programs for foundry process simulation. *iPolytech Journal*, vol. 22, no. 11, pp. 209–218, doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-209-218> [in Russian].
9. Alekhin, V.I., Belogub, A.V., Marchenko, A.P., Akimov, O.V. (2009). Computer-integrated modeling of foundry processes in automobile pistons based on the design and technological methodology for designing engine parts. *Scientific and technical journal "Internal combustion engines"*. Kharkiv: NTU "KhPI", no. 2, pp. 101–104 [in Russian].
10. Ponomarenko, O.I., Kosenko, O.P., Shvets, M.V., Yevtushenko, S.D. (2019). Application of computer-integrated design for non-technological castings of mine equipment. *Metal and Casting of Ukraine*, no. 3–4 (310–311), pp. 18–24 [in Russian].
11. Akimov, O., Kostyk, K., Klymenko, S., Penzev, P., Saltykov, L. (2021). Ensuring the Technological Parameters of Cast Block Crankcase of Automobile's Diesel Engine. In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (Eds.) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_1
12. Boldin, A.N., Davydov, N.I., Zhukovsky, S.S. et al. (2006). Foundry molding materials. Molding, core mixtures and coatings: Handbook. Moscow: Mashinostroenie, 507 p. [in Russian].
13. Golofaev, A.N., Laguta, V.I., Khinchakov, G.V. (2001). Casting mold technology. Lugansk: VNU Publishing House, 264 p. [in Russian].
14. Lyuty, R.V., Guria, I.M. (2020). Molding materials: handbook for students, specialty 136 "Metallurgy", educational program "Computerized casting processes". Kyiv: KPI im. Igor Sikorsky, 258 p. [in Ukrainian].
15. Berlizova, T.V., Ponomarenko, O.I., Kachanova, N.A. (2015). Modeling of the properties of CTS based on chromite sand and cyclocarbonates. *Compressor and power engineering*, no. 1 (39), pp. 48–51 [in Russian].
16. Artomova, S.V., Budarin, O.S., Bondarenko, V.S., Bezvesilna, O.M., Ponomarenko, O.I., Marchenko, A.P., Akimov, O.V., Mykhailiukov, V.P. (2022). Heat treatment and properties of a cast complex profile blade of a hydroturbine. *Metalozn. obrobka met.*, vol. 28 (102), no. 2, pp. 58–63, doi: <https://doi.org/10.15407/mom2022.02.058> [in Ukrainian].

Received 27.06.2022

Summary

V.S. Bondarenko¹, Head of the metallurgical department – Chief Metallurgist, e-mail: v.bondarenko@ukrenergymachines.com
O.M. Bezvesilna¹, Deputy head of the metallurgical department, e-mail: e.bezvesilnay@ukrenergymachines.com
O.I. Ponomarenko², Dr. Sci. (Engin.), Professor, Professor of the Department, e-mail: 21ponomarenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3043-4497>
O.S. Budarin¹, Deputy General Director, e-mail: budarin@ukrenergymachines.com
A.P. Marchenko², Dr. Sci. (Engin.), Professor, Vice-rector for Scientific Work, e-mail: Andrii.Marchenko@khpi.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9746-4634>
O.V. Akimov², Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of Chair/Sub-Department, e-mail: Oleg.Akimov@khpi.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7583-9976>
S.V. Artomova¹, Head of the Central Plant Laboratory, e-mail: artemova@ukrenergymachines.com, <https://orcid.org/0000-0003-2075-5518>
V.P. Mykhailiukov¹, Casting and forging shop manager, e-mail: Vov63.4ik@gmail.com
S.D. Yevtushenko², undergraduate, e-mail: stepanco.00@ukr.net

¹Joint Stock Company “Ukrainian Energy Machines” (Ukrenergymachines JSC) (Kharkiv, Ukraine)

²National technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” (Kharkiv, Ukraine)

Innovative manufacturing technology for the casting of a blade of a radial-axial turbine impeller

The purpose of the study is to develop a progressive technology for casting the impeller blade of the Dniester Pumped Storage Power Station (PSPS).

To solve the problem of improving the quality of castings, computer-integrated methods for modeling casting processes were used. The use of CAD/CAE programs has significantly reduced the time for the development of technological processes, created conditions for directional solidification of castings, calculated the optimal amount of head of castings and, by predicting the appearance of defect locations, reduced the shortage of castings.

The production of a one-piece cast impeller blade made of SA-6NM stainless steel became possible after the reconstruction of the metallurgical production of Ukrenergymachines JSC and the overhaul of the electric arc furnace.

Structural stability, stability of physical and mechanical properties in the production of CA-6NM steel is achieved by obtaining a given ratio of chromium and nickel equivalent using computer control of the steel composition during smelting. Stainless steel was smelted in two electric arc furnaces with basic lining. After release, the metal was sold through slotted lances in ladles with argon.

The shaping equipment was represented by a complex volumetric model set. Spatial templates, core boxes and a model sign were made. In the manufacture of rods, frameworks of complex design and cold-hardening molding mixtures on chromite sands by the furan process were used. In the manufacture of rods for parts of heads of castings, exothermic materials were used.

The reduction in the cost of blade castings from the transfer from a welded-cast version to a solid-cast one and the organization of their production in the conditions of the foundry shop of Ukrenergymachines JSC amounted to 30 %.

Keywords

Blade, cast part, LVM Flow, SolidWorks, computer design, directional hardening, chromite sand, furan process, quality.