

А.Ш. Желяков¹, головний металург генераторного та електротехнічного виробництва

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

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

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

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>

¹АТ «Укренергомашини» (Харків, Україна)

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

Прогресивна технологія виготовлення литих деталей щік полюса ротора гідрогенератора

У роботі запропоновано прогресивну технологію виробництва литих деталей щік полюса ротора гідрогенератора замість поковок. Роботу виконано в рамках модернізації генераторного обладнання АТ «Укргідроенерго», яке експлуатує всі великі гідроелектростанції, розташовані на українських ділянках Дніпра та Дністра.

Метою дослідження даної роботи є розробка технології виливки щік полюсів для роторів гідрогенераторів на ДніпроГЕС-2, Середньодніпровську та Кременчуцьку гідроелектростанції.

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 прибутку і за рахунок прогнозування появи місць дислокації дефектів, зменшити брак виливків, перевірити її на різні види міцнісних навантажень на віртуальній моделі.

В результаті виробничих випробувань було обрано ефективне протипригарне покриття для форм та стрижнів. В роботі проводили дослідження впливу модифікатора марки СК10Ба10 на механічні властивості та мікроструктуру литої сталі 25Л ДСТУ 8781:2018. Показники механічних випробувань перевищують допустимі значення міцності на 20–30 %, а ударну в'язкість – на 110–130 %.

Економічна ефективність виготовлення литих деталей щік полюса ротора гідрогенератора замість поковок дозволила знизити витрати на 40 %. Перший комплект виготовлених за новою технологією литих заготовок щік полюса було механічно оброблено заводом і виготовлені полюси встановлено на ротор гідрогенератора ДніпроГЕС-2.

Ключові слова: модернізація, лита деталь, LVMFlow, SolidWorks, комп'ютерно-інтегроване проектування, спрямоване твердіння, протипригарне покриття, модифікування, якість.

Вступ. Потреба модернізації гідроелектростанцій (ГЕС) у світі зростає, оскільки вони були побудовані в другій половині ХХ століття. Переваги гідроенергетики, зокрема потенціал проточної води, використовувалися з давніх часів. Енергія, що отримується з води за допомогою гідроелектростанцій, вважається найбільш надійною та рентабельною технологією в порівнянні з іншими відновлюваними джерелами енергії. Гідроелектростанції екологічно чисті, вони є стабільним та безпечним джерелом виробництва електроенергії. У багатьох випадках модернізація старих електростанцій набагато доцільніша, ніж будівництво нових. Витрати, вплив на навколишнє середовище, соціальний вплив та терміни реалізації проєкту можуть виявитися більш прийнятними у цьому випадку.

Основна мета модернізації – продовження терміну служби та покращення експлуатаційних властивостей машин, тим самим підвищуючи експлуатаційну готовність та знижуючи експлуатаційні витрати гідроелектростанції.

Наразі реалізується проєкт модернізації генераторного обладнання АТ «Укргідроенерго», яке експлуатує всі великі гідроелектростанції, розташовані на українських ділянках Дніпра та Дністра. Сумарна встановлена електрична потужність гідроелектростанцій АТ «Укргідроенерго» становить 5744,8 МВт.

Одне з важливих завдань підвищення енергоефективності гідрогенераторів – це їх модернізація. Гідрогенератор – це синхронна електрична машина трифазного струму, що приводиться в обертання гідроенергією.

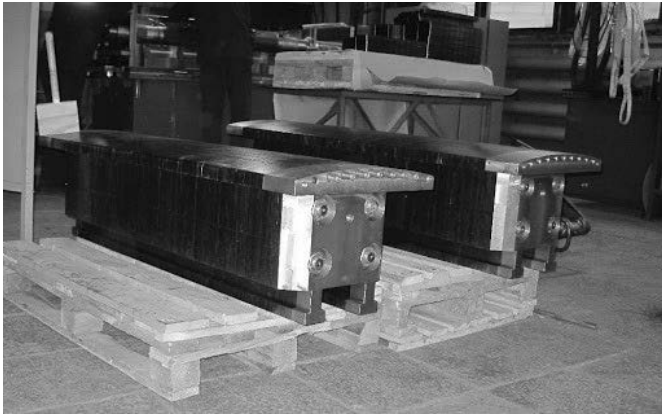


Рис. 1. Полюс ротора

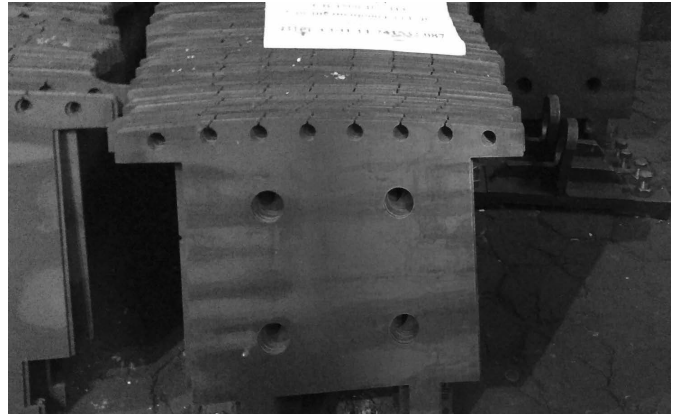


Рис. 2. Сталеві пластини сердечника полюса ротора

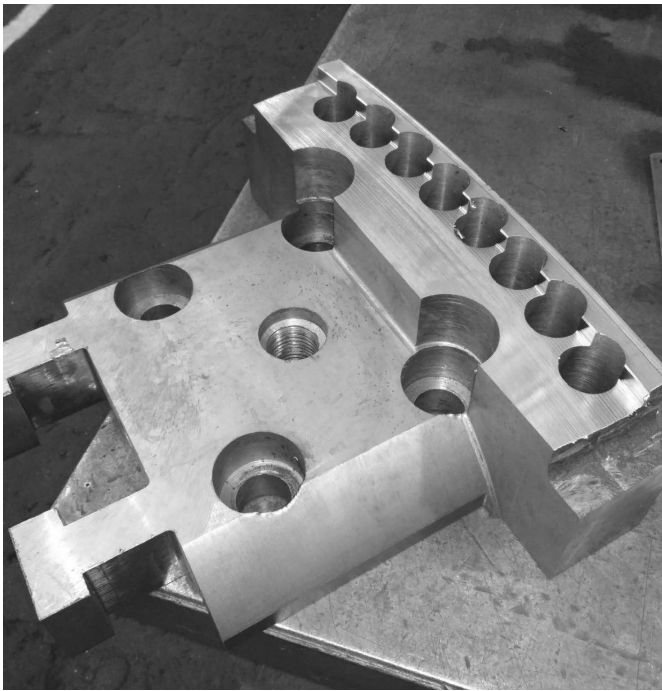


Рис. 3. Щока полюса

ротурбіною і перетворює механічну енергію турбіни на електричну. Генератор складається з нерухомої частини – статора, що включає в себе корпус і сердечник з обмоткою, а також ротора, що обертається, у складі якого: остов, спиці, обід і полюса. На зовнішній стороні обода ротора прикріплені полюси ротора (рис. 1), що складаються із сердечника, зібраного з окремих сталевих пластин (рис. 2), полюсного наконечника (сталевих кованих або литих щік (рис. 3)) та полюсної котушки. Полюси ротора кріплять до обода у вигляді хвостів зазвичай Т-образної форми.

До хвостових частин (вузлів кріплення) щік полюса пред'являються підвищені вимоги міцності, щоб не допустити їх руйнування в процесі роботи генератора, особливо при роботі його в режимі угону (угінна частота обертання ротора гідрогенератора).

Метою дослідження даної роботи є розробка технології виливки щік полюсів для роторів гідрогенераторів на ДніпроГЕС-2, Середньодніпровську та Кременчуцьку гідроелектростанції. Технічні характеристики генераторів для цих гідроелектростанцій представлено в табл. 1.

Вибір технології виготовлення відповідальних деталей завжди є складним завданням. Для того, щоб знизити вартість заготівлі, було прийнято рішення зробити її литою і відмовитися від виробництва поковок, тобто отримання заготовки, методом пластичної деформації металу. 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 [1, 2].

Спільним для різних способів виготовлення литих заготовок є отримання рідкого розплаву, виготовлення форми і заливка розплаву у форму. Основні фактори, що враховувалися для вибору способу лиття даної литої заготовки:

1. Для отримання якісних виливків в першу чергу були враховані технологічні властивості сплаву (рідкотекучість, схильність до усадкової та газової пористості, до ліквідації тощо).

2. Спосіб виготовлення литих заготовок повинен унеможливити дефекти ливарного походження, забезпечувати можливість отримання дрібнозернистої структури і, відповідно, забезпечити високі механічні властивості.

3. При виборі способу виготовлення заготовок враховувалася технологічність конструкції деталі стосовно кожного з способів, що розглядаються.

Крім того, лита сталь для виготовлення заготовок щік полюсів повинна відповідати підвищеним експлуатаційним вимогам, тобто мати достатні міцність, твердість, пластичність, малу крихкість, високу ударну в'язкість.

Підготовка виробництва виробу є найважливішим етапом, під час якого визначається можливість виробництва за умов конкретного підприємства, тут розробляється 3D-модель майбутнього виробу, виробляється моделювання, доведення технології виробництва, випускається технологічна документація виробу.

Одним з головних етапів виготовлення виробу є вибір способу виготовлення виливка та оцінка можливості його виготовлення на наявному обладнанні. Створення 3D-моделі виробу відбувається за до-

Технічні характеристики генераторів для цих гідроелектростанцій

Тип машини	Найменування ГЕС	Номинальна потужність, МВт	Cos φ	Напруга, кВ	Номинальна частота обертання, об/хв	Угонна частота обертання, об/хв	Частота, Гц	Виконання
СВ 1230/140-56	ДніпроГЕС-2	104,5	0,8	13,8	107,1	215	50	парасолькове
СВ 1500/110-116М	Середньодніпровська	48,4	0,8	10,5	51,7	108	50	парасолькове
СВКр 1340/150-96М	Кременчуцька	60	0,8	13,8	62,5	138	50	парасолькове

помогою CAD пакетів різного рівня, які безконфліктно працюють в середовищі PDM системи. Надалі 3D-модель є основою різних конструкційних розрахунків з експлуатаційними навантаженнями. Потім на її основі створюються 3D-моделі виливка та оснастки для його виготовлення [2–4].

Далі проводиться моделювання технологічного процесу виробництва литої деталі за допомогою CAE систем. Після аналізу отриманих результатів моделювання вносяться зміни в 3D-моделі деталі та виливка. При цьому, при внесенні деяких поправок у 3D-моделі деталі, таких як дислоковані ливарні дефекти, проводяться повторні конструкційні розрахунки з експлуатаційними навантаженнями, з подальшим внесенням поправок до конструкції деталі [5, 6].

З вищезгаданого випливає, що технологічне проектування забезпечує постійну та повну взаємодію технічних підрозділів, відповідальних за випуск технічної документації для виробу. 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.

Сьогодні в практиці проектування литих деталей, а також для вирішення задач з моделювання процесів їхньої кристалізації, застосовується ряд спеціалізованих програмних пакетів тривимірного проектування [7–9]. Враховуючи, що вибір вихідних параметрів для комп'ютерного моделювання здійснюється безпосередньо конструктором або технологом на основі особистого досвіду, буває заздалегідь проблематичним з великим ступенем ймовірності визначити правильність обраних технічних рішень. Питання, пов'язані з формалізацією процесів локалізації внутрішніх дефектів ливарного походження, повинні обов'язково вирішуватись на етапі комп'ютерного моделювання процесу кристалізації литої деталі. Отримання якісних виливків можливе за рахунок використання нових методів та програмних продуктів, таких як SolidWorks та LVMFlow [10, 11].

Для 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.

При розробці технології виготовлення литих заготовок щік полюса вирішували комплексне завдання

щодо забезпечення спрямованого затвердіння рідкого металу у формі за умови вертикальної заливки заготовки щіки у формі з обов'язковим розташуванням у нижній частині виливка хвостових частин заготовок щік (додаткове ущільнення металу феростатичним тиском заготовки з виведенням у прибуткову частину виливка газів, неметалевих включень та дефектів усадкового характеру).

Для спрямованого затвердіння в технології виливка були передбачені конструктивні ливарні ухили у напрямку затвердіння, встановлені розраховані за об'ємом прибутки, які забезпечували спрямоване тепловідведення та затвердіння виливка щіки. Для перевірки розробленої технології виливка «Щіка полюса для роторів гідрогенераторів» на кафедрі ливарного виробництва НТУ «ХПІ» було проведено комп'ютерне моделювання процесу заливання та кристалізації щік полюса для генератора СВ1-1230/140-56М для Дніпровської ГЕС-2, внаслідок якого було внесено корегування у технологію виготовлення виливка. Виливок щік полюсів для роторів гідрогенератора представлений на рис. 4 у 3D-системі. Габарити виливка 515x200x450 мм. Вага заготовки щіки полюса становить 145 кг.

В результаті відкоригованої технології виготовлення виливків при подальшій механічній обробці литих заготовок було отримано висновок про відсутність усадкових дефектів та забезпечення високої якості литих заготовок щік полюса.

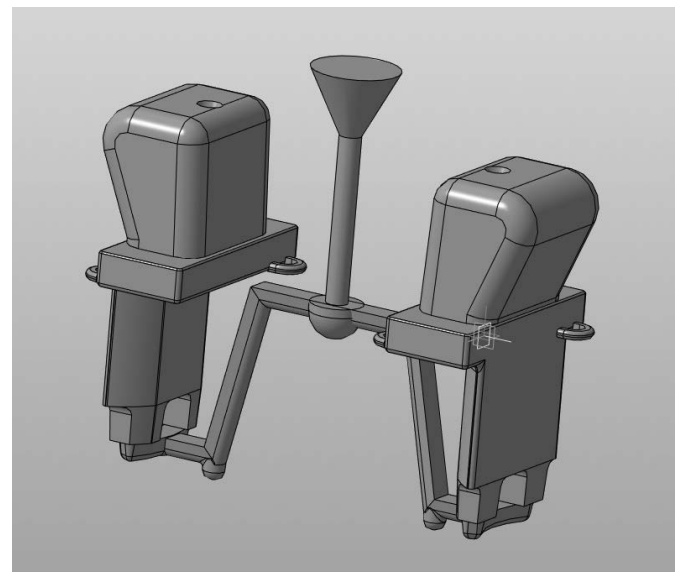


Рис. 4. Проектування 3D-виливка



Рис. 5. Установка комбінованого сушіння напівформ

Для виготовлення виливка було обрано спосіб лиття в разові піщані форми. Формування напівформ здійснювали на струшувальних машинах моделі 235М з додатковим ущільненням пневмотрамбуванням до щільності набивання верхньої напівформи 65–75 од., нижньої напівформи 70–80 од.

Для виготовлення виливка використовували облицювальну та наповнювальну суміші. Як облицювальну використовувалася рідко-скляна суміш, а як наповнювальна – піщано-глиниста суміш.

Готові напівформи передавалися на спеціально розроблені та виготовлені заводом установки комбінованого сушіння напівформ (рис. 5), де вони проходили термічне сушіння гарячим (180–220 °С) повітрям робочої поверхні форми з подальшим продуванням через дозатор вуглекислим газом для збільшення товщини сухого робочого шару форми до 20 мм та для охолодження поверхні форми після нагрівання для подальшого фарбування поверхні форми протипригарною фарбою.

На стрижневій ділянці цеху виготовляли підливникові стрижні з холодно-твердіючої суміші з затверджувачем ацетат етиленгліколь (АЦЕГ), які після готовності фарбували протипригарною самовисихаючою фарбою і передавали на плац складання та заливання форм.

Для зменшення пригару на виливках щік полюса в умовах сталеливарного цеху були проведені виробничі випробування самовисихаючого протипригарного покриття «Blanket Z-II» на основі циркону (виробництва ТОВ «Керамплюс» м. Дніпро) та протипригарної фарби АПС-1 (Росія).

Застосування самовисихаючого протипригарного покриття «Blanket Z-II» в умовах ливарного виробництва заводу показало ряд переваг у порівнянні з протипригарною фарбою АПС-1 (Росія):

- покращена термостійкість і, як наслідок, – зниження утворення пригару на виливках;
- покращена криюча здатність протипригарного покриття «Blanket Z-II», товщина шару поверхні форми, що просочується, становить 3–4 мм, замість 1,5–2,0 мм для АПС-1;
- поліпшена (підвищена) седиментаційна стійкість покриття «Blanket Z-II» на основі циркону, тобто по-

криття менше осідає і не вимагає постійного розведення лаком та неодноразового перемішування.

Виливки щік полюса, виготовлені з використанням протипригарної фарби «Blanket Z-II», мали менший пригар порівняно з раніше використаною фарбою АПС-1.

Підвищення вимог до експлуатаційної надійності литих деталей спричиняє вдосконалення всіх етапів технологічного процесу виготовлення виливків з урахуванням їхнього впливу на кінцевий результат. Важливе місце у відпрацюванні технології виготовлення якісних виливків відводилося процесам виплавки сталі. Головним завданням було виплавлення сталі, яка за своїм хімічним складом та структурою задовольняє пред'явленим до неї вимогам відповідального виливка. При цьому прагнули найменших витрат вихідних матеріалів, енергетичних ресурсів, людської праці. Матеріал виливка – сталь 25Л ДСТУ 8781:2018.

Велику увагу приділили якості шихти, що використовується для виплавки сталі, та модифікації розплаву з метою видалення неметалевих включень і газів. Крім того, модифікатори активно впливають на первинну кристалізацію і змінюють ступінь дисперсності фаз, що кристалізуються шляхом введення в розплав малих добавок окремих хімічних елементів або сполук. Безумовно, ефект модифікування залежить від активності добавок, що вводяться, окисленості, газонасиченості, забрудненості металу, його фізико-хімічних властивостей, температури розплаву, тривалості його витримки в ковші тощо. При виборі модифікатора віддавали перевагу лігатурам, що містять кальцій, які використовують при модифікуванні в ковші.

Вплив кальцію на структуру та властивості сталі проявляється у послідовному перебігу багатостадійного процесу, зумовленого його високою хімічною активністю: рафінування рідкого металу (розкислення та десульфурізація); глобуляризація неметалевих включень; модифікування макро- та мікроструктури тощо.

У сталі, обробленій кальцієм, на поверхні внутрішньозеренного в'язкого зламу з'являються округлі неметалеві включення сульфідів і оксисульфідів, що містять кальцій, які в силу своєї морфології не мають хрумкого впливу.

У цьому спостерігається збільшення пластичності металу: ударний вигин – щонайменше ніж удвічі, відносне звуження – на 15–30 %, відносне подовження – на 10–15 %. Введення мікродобавок кальцію також дещо збільшує рівень властивостей міцності сталі.

В роботі проводили дослідження впливу модифікатора марки СК10Ба10 (із вмістом 9–12 %, Са – 9–12 %, Si – 55 %) ТУ У 14-5-139-89 на механічні властивості та мікроструктуру литої сталі 25Л ДСТУ 8781:2018.

Модифікування рідкого металу проводили під час випуску його з печі в ковші. У сталь вводили той самий модифікатор різного розважування. Для модифікування сталі вводили модифікатор СК10Ба10 у кількості 0,07 %, 0,1 % і 0,13 % від ваги рідкого металу.

Заливання ливарних форм здійснювали за температури рідкої сталі (1560–1580) °С. У середині роз-

ливу металу у форми з кожного ковша були залиті проби (зразки-свідки) для проведення випробувань на механічні властивості та мікроструктуру сталі, які проходили термообробку в печі разом з виливками щік за режимом:

- нормалізація – 890 °С;
- відпускання – 640 °С.

Механічні випробування зразків після модифікування в лабораторії механічних випробувань та металографії центральної заводської лабораторії (ЦЗЛ) заводу показали: сталь 25Л, модифікована СК10Ба10 у кількості 0,07 %, 0,1 % та 0,13 % від ваги рідкого металу в ковші за механічними властивостями відповідає вимогам ДСТУ 8781:2018. Проте з економічних міркувань використання СК10Ба10 у кількості 0,13 % від ваги рідкого металу довелося відмовитися.

Порівнюючи результати механічних випробувань і мікроструктуру цих зразків, модифікованих за різними варіантами введення кількості модифікатора СК10Ба10 (з вмістом 9–12 %, Са – 9–12 %, Si – 55 %) від ваги рідкого металу, можна зробити наступні висновки:

1. Результати модифікованих плавок модифікатором СК10Ба10 (з вмістом 9–12 %, Са – 9–12 %, Si – 55 %) 0,10 % від ваги рідкого металу, термооброблених за режимом: нормалізація + відпускання трохи вище, ніж при введенні модифікатора кількості 0,07 %. Проте за механічними властивостями обидва сплави відповідають вимогам ДСТУ 8781:2018.

2. Показники механічних випробувань перевищують допустимі значення міцності ДСТУ 8781:2018 на 20–30 %, а ударну в'язкість – на 110–130 %.

3. Мікроструктура цих зразків містить невеликі ділянки відманштетту до 2 балів (ГОСТ 5640-68), величина зерна відповідає 8–10 балів (ГОСТ 5639-82).

За вмістом неметалевих включень (до 3 бала ГОСТ 5639-82) та величиною зерна мікроструктура цих зразків чистіша і дрібнозерніша, ніж отримана без модифікування сталі.

Результати механічних випробувань зразків представлено у табл. 2.

Проведений порівняльний аналіз витрат на при-

дбання комплекту поковок для виготовлення щік полюса гідрогенератора ДніпроГЕС2 (114 штук поковок) та собівартості виготовлення литих заготовок власного виробництва показав, що економічна ефективність виготовлення литих заготовок щік полюса замість покупки поковок дозволила знизити витрати на виготовлення комплекту щік полюса гідрогенератора на 40 %.

Перший комплект виготовлених за новою технологією литих заготовок щік полюса був механічно оброблений заводом, і виготовлені полюси були встановлені на ротор гідрогенератора ДніпроГЕС-2, який був введений в експлуатацію і вже успішно виробляє (генерує) електроенергію. Готуються до запуску гідроенергетичні Середньодніпровської та Кременчуцької ГЕС із встановленими на полюсах ротора щоками, виготовленими з литих заготовок за новою відпрацьованою заводом спільно з НТУ «ХПІ» технологією.

Висновки

1. В даний час у світі зростає потреба в модернізації гідроелектростанцій, оскільки вони були збудовані в другій половині ХХ століття. У багатьох випадках модернізація старих електростанцій набагато доцільніша, ніж будівництво нових.

2. Наразі реалізується проєкт модернізації генераторного обладнання АТ «Укргідроенерго», яке експлуатує всі великі гідроелектростанції, розташовані на українських ділянках Дніпра та Дністра.

3. Одним із можливих шляхів вирішення завдання підвищення якості виливків є використання математичних чи комп'ютерно-інтегрованих методів моделювання процесів. Використання CAD/CAE програм відкриває нові можливості для інженерів-технологів та конструкторів, значно скорочується час на розробку технологічних процесів. Це дозволило за рахунок прогнозування появи місць дислокації дефектів зменшити брак виливків, а також дало можливість перевірки деталі на різні види навантаження міцності на її віртуальній моделі.

4. Для спрямованого затвердіння у технології виливка були передбачені конструктивні ливарні ухили

Таблиця 2

Результати досліджень механічних властивостей

Марка сталі, № плавки	Марка модифікатора та його кількість	Вміст елементів, %										Вид та режим термообробки	Механічні властивості, не менше				
		C	Si	Mn	Al	Cr	S	P	Ni	V	Cu		σ_B , МПа	σ_T , МПа	Δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
25Л	ДСТУ 8781:2018	0,22–0,30	0,20–0,52	0,45–0,90	0,02–0,04	< 0,3	< 0,05	< 0,05	< 0,3	0,06–0,15	< 0,3	нормалізація = 890 °С відпускання = 640 °С	441	235	19	30	39,2
№ 1 (25Л)	СК10Ба10 = 5,0 кг (0,07 %)	0,27	0,30	0,60	0,03	0,05	0,020	0,027	0,05	–	0,13	нормалізація = 890 °С ± 10 °С; відпускання = 640 °С ± 10 °С	480	270	31	52	87,9 63,2
№ 2 (25Л)	СК10Ба10 = 7,5 кг (0,1 %)	0,26	0,34	0,6	0,03	0,03	0,021	0,027	0,04	–	0,10		510	290	30	55	79,0 70,4

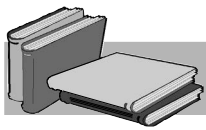
у напрямку затвердіння, встановлені розраховані за об'ємом прибутки, які забезпечували спрямоване тепловідведення та затвердіння виливка щокі.

5. Для зменшення пригару на виливках щік полюса в умовах сталеливарного цеху були проведені виробничі випробування самовисихаючого проти-пригарного покриття «Blanket Z-II» на основі циркону (виробництва ТОВ «Керамплюс» м. Дніпро) та проти-пригарної фарби АПС-1 (Росія). Застосування самовисихаючого протипригарного покриття «Blanket Z-II» в умовах ливарного виробництва заводу показало ряд переваг у порівнянні з протипригарною фарбою АПС-1 (Росія).

6. У роботі проводили дослідження впливу модифікатора марки СК10Ба10 (зі вмістом 9–12 %, Са – 9–12 %, Si – 55 %) ТУ У 14-5-139-89 на механічні властивості та мікроструктуру литої сталі 25Л ДСТУ 8781:2018 року. Модифікування рідкого металу проводили при випуску його з печі в ковші, в кількості 0,07 % від ваги рідкого металу. Показники механічних випробувань перевищують допустимі міцнісні значення ДСТУ 8781:2018 на 20–30 %, а ударну в'язкість – на 110–130 %.

7. Економічна ефективність виготовлення комплекту литих заготовок щік полюса ротора гідрогенератора замість покупних поковок дозволила знизити витрати на 40 %.

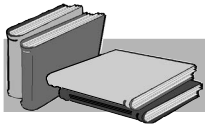
7. Економічна ефективність виготовлення комплекту литих заготовок щік полюса ротора гідрогенератора замість покупних поковок дозволила знизити витрати на 40 %.



ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. Никаноров А.В. Сравнительный анализ компьютерных программ для моделирования литейных процессов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018. № 22 (11). С. 209–218. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-209-218>
3. Вдовин Р.А. Компьютерное моделирование технологического процесса литья деталей двигателей в модуле Visual-Mesh программного продукта ProCast: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. 108 с.
4. Nitin Amratav, Kulyant Kumar, Megad Pillai. Computer Simulation of Continuous Casting Processes: A Review. *Advances in Materials*. 2021. Vol. 10. Iss. 3. P. 31–41. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.am.20211003.11>
5. 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. 2021. P. 3–11. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_1
6. Akimov O.V., Marchenko A.P., Alyokhin V.I., Soloshenko V., Shinsky O.Y., Klymenko S.I., Kostyk K.O. Computer Engineering and Design of Cast Parts for Internal Combustion Engine Crankcase. *Journal of Engineering Sciences*. 2019. Vol. 6. Iss. 2. P. E 24–E 30. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2019.6\(2\).e4](https://doi.org/10.21272/jes.2019.6(2).e4)
7. Габельченко Н.И., Жаркова В.Ф., Жильцов Н.П., Белов А.А. Использование системы компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «ПолигонСОФТ» версии 20.0*. *Известия Волгоградского госуниверситета. техн. ун-та*. 2021. № 7 (254). С. 92–95.
8. Hyuk-JaeKwon, Hong-KyuKwon. Computer aided engineering (CAE) simulation for the design optimization of gate system on high pressure die casting (HPDC) process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2019. Vol. 55. Part B. P. 147–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.01.003>
9. Mohd. Bilal Naim Shaikh, Shazeb Ahmad, Arfeen Khan, Mohammed Ali. Optimization of Multi-Gate Systems in Casting Process: Experimental and Simulation Studies. Published under license by IOP Publishing Ltd. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Volume 404. 1st International Conference on Contemporary Research in Mechanical Engineering with Focus on Materials and Manufacturing (ICCRME-2018) 6–7 April 2018, Lucknow, India. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/404/1/012040>
10. Пономаренко О.И., Косенко О.П., Шве́ц 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. Рафальский И.В., Лущик П.Е. Математическое моделирование процесса кристаллизации и разработка технологии изготовления бездефектных отливок из алюминиевых сплавов. *Литейное производство и металлургия*, 2017. *Беларусь: сборник трудов 25-й Международной научно-технической конференции, Минск, 18–19 октября / под общ. ред. Е.И. Маруковича*. Минск: БНТУ, 2017. С. 127–133.

Надійшла 09.02.2022



REFERENCES

1. Ponomarenko, O.I., Lysenko, T.V., Stanovsky, A.L., Shinsky, O.I. (2012). Management of foundry systems and processes: Monograph. Kharkiv: Pidruchnyk NTU "KhPI", 368 p. [in Russian].
2. Nikanorov, A.V. (2018). Comparative analysis of computer programs for modeling foundry processes. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, no. 22 (11), pp. 209–218, doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-209-218> [in Russian].
3. Vdovin, R.A. (2019). Computer modeling of the technological process of casting engine parts in the Visual-Mesh module of the ProCast software product: textbook. Allowance. Samara: Publishing House of Samara University, 108 p. [in Russian].
4. Nitin Amratav, Kulyant Kumar, Megad Pillai (2021). Computer Simulation of Continuous Casting Processes: A Review. *Advances in Materials*, vol. 10, iss. 3, pp. 31–41, doi: <https://doi.org/10.11648/j.am.20211003.11>
5. 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, pp. 3–11, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_1
6. Akimov, O.V., Marchenko, A.P., Alyokhin, V.I., Soloshenko, V., Shinsky, O.Y., Klymenko, S.I., Kostyk, K.O. (2019). Computer Engineering and Design of Cast Parts for Internal Combustion Engine Crankcase. *Journal of Engineering Sciences*, vol. 6, iss. 2, pp. E 24–E 30, doi: [https://doi.org/10.21272/jes.2019.6\(2\).e4](https://doi.org/10.21272/jes.2019.6(2).e4)
7. Gabelchenko, N.I., Zharkova, V.F., Zhiltsov, N.P., Belov, A.A. (2021). Using the system of computer simulation of foundry processes (SCM LP) "PolygonSOFT" version 20.0 *. *News of the Volgograd State. tech. university*, no. 7 (254), pp. 92–95 [in Russian].
8. Hyuk-JaeKwon, Hong-KyuKwon (2019). Computer aided engineering (CAE) simulation for the design optimization of gate system on high pressure die casting (HPDC) process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 55, Part B, pp. 147–153, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.01.003>
9. Mohd. Bilal Naim Shaikh, Shazeb Ahmad, Arfeen Khan, Mohammed Ali (2018). Optimization of Multi-Gate Systems in Casting Process: Experimental and Simulation Studies. Published under license by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, volume 404, 1st International Conference on Contemporary Research in Mechanical Engineering with Focus on Materials and Manufacturing (ICCRME–2018) 6–7 April 2018, Lucknow, India. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/404/1/012040>
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. Rafalsky, I.V., Lushchik, P.E. (2017). Mathematic simulation of the crystallization process and development of manufacturing techniques of faultless mould pieces' production from aluminium alloys. *Foundry and metallurgy, 2017. Belarus: Proceedings of the 25th International Scientific and Technical Conference, Minsk, October 18–19. ed. by E.I. Marukovich*. Minsk: BNTU, pp. 127–133 [in Russian].

Received 09.02.2022

Summary

A.Sh. Zhelyakov¹, Chief Metallurgist of generator and electrical production
O.S. Budarin¹, Deputy General Director,
 e-mail: budarin@ukrenergymachines.com
V.S. Bondarenko¹, Head of the metallurgical department – Chief
 Metallurgist, e-mail: v.bondarenko@ukrenergymachines.com
O.I. Ponomarenko², Dr. Sci. (Engin.), Prof., Professor of the Department,
 e-mail: 21ponomarenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3043-4497>
A.P. Marchenko², Dr. Sci. (Engin.), Prof., 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.), Prof., Head of the Department,
 e-mail: Oleg.Akimov@khpi.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7583-9976>

¹*Ukrenergymachines JSC (Kharkiv, Ukraine)*

²*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (Kharkiv, Ukraine)*

Progressive technology for manufacture of cast parts of hydraulic generator rotor pole cheeks

The paper proposes a progressive technology for the production of cast parts for hydro generator rotor pole cheeks instead of forgings. The work was carried out as part of the modernization of the generating equipment of JSC "Ukrhydroenergo", which operates all large hydroelectric power plants located in the Ukrainian sections of the Dnieper and Dniester.

The purpose of the study of this work is to develop a technology for casting pole cheeks for rotors of hydroelectric generators at Dnieper HPP-2, Srednedneprovskaya and Kremenchug hydroelectric power plants.

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 profit margin and, by predicting the appearance of defect locations, reduced casting rejects, tested it for various types of strength loads on a virtual model.

As a result of production tests, an effective non-stick coating for molds and cores was selected. In this work, we studied the effect of the modifier grade CK10Ba10 on the mechanical properties and microstructure of cast steel 25Л ДСТУ 8781:2018. Indicators of mechanical tests exceed the allowable strength values by 20–30 %, and impact strength – by 110–130 %.

The economic efficiency of manufacturing cast blanks for hydro generator rotor pole cheeks instead of forgings allowed to reduce costs by 40 %. The first set of pole cheeks made by new technology was machined by the plant and the poles were installed on the rotor of the Dnieper HPP-2 hydro generator.

Keywords

Modernization, casting part, LVMFlow, SolidWorks, computer-integrated design, directional solidifying, non-stick coating, modification, quality.