

Термічна обробка і властивості литої складнопрофільної лопаті гідротурбіни

Артёмова С. В., начальник центральної заводської лабораторії, artemova@ukrenergymachines.com

Бударін О. С., заступник генерального директора

Бондаренко В. С., начальник металургійного відділу – головний металург

Безвесільна О. М., заступник начальника металургійного відділу

Пономаренко О. І.*, доктор технічних наук, професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3043-4497>, 21ponomarenko@gmail.com

Марченко А. П.*, доктор технічних наук, професор проректор з наукової роботи, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9746-4634>

Акімов О. В.*, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7583-9976>

Михайлюков В. П., начальник цеху лиття та поковок

АТ "Укренергомашини", Україна, Харків

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Україна, Харків

Відпрацьовано режим термічної обробки масивних виливків лопатей робочого колеса гідротурбіни «Дністровської ГАЕС» із сталі мартенситного класу СА-6NM. На основі визначення механічних властивостей, вимірів твердості по всій поверхні лопатей і металографічних досліджень показано доцільність запропонованого режиму термообробки з використанням після високотемпературного аустенітизуючого нагріву інтенсивного охолодження і високого відпуску. Показано, що такий режим забезпечує необхідний рівень механічних властивостей виливків лопатей, усуває негативний вплив внутрішніх напружень, що виникають під час кристалізації і швидкому охолодженні при наступній термічній обробці. Визначення хімічного складу виливків і відповідність його вимогам ASTM A743/A743M-98a забезпечує одержання необхідного рівня властивостей виробів. Металографічно встановлено відсутність небажаної ліквачії і однорідність структури, рівномірність механічних властивостей по тілу лопаті, що зумовлює підвищення опору руйнування внаслідок кавітації.

В результаті досліджень підтверджено доцільність застосування наступного режиму термічної обробки масивних складнопрофільних виливків лопатей з корозійностійкої сталі мартенситного класу СА-6NM, що складається з нагріву до температури 1030-1040°C і відпуску при 580-590°C з використанням швидкого охолодження після високотемпературного нагріву.

Ключові слова: лопаті гідротурбін, термічна обробка, структура, механічні властивості.

Розвиток сучасного гідротурбовиробництва вимагає вирішення низки питань щодо матеріалів і якості відповідальних масивних литих виробів, зокрема до лопатей робочих коліс гідротурбін. Вони повинні забезпечувати високі механічні властивості і рівномірність розподілу їх значень по перерізу виробів; однорідність структури; стійкість до кавітаційної ерозії; високі ливарні та технологічні властивості [1, 2]. Відзначимо, що природа руйнування внаслідок кавітаційної ерозії матеріалів вивчена не достатньо і досі відсутні загальновизнані уявлення щодо цього явища [3-10].

Зважаючи на складність форми і значні товщини лопатей гідротурбін, слід розглядати як визначальну умову їх надійність при експлуатації, однорідність литої структури і стабільність рівномірного розподілу властивостей по перерізу цих виробів [11].

Виходячи з цього, метою роботи є відпрацювання режиму термічної обробки литої лопаті робочого колеса радіально-осьової гідротурбіни зі сталі мартенситного класу СА-6NM для умов виробництва АТ «Українські енергетичні машини».

Робоче колесо турбіни Дністровської ГАЕС діаметром 7,3 м складається з маточини, обода і семи цільнолитих лопатей складної форми з характерним S-подібним вигином, що зумовлює складну систему навантажень останніх (рис. 1). Зміна перерізу товщини вхідної та вихідної крайок від 15 мм до 100 мм, різниця між ними близько 1 м. Вага литої заготовки деталі 8500 кг, вага деталі (лопать) – 4800 кг.



Рис. 1.Робоче колесо гідротурбіни.

Fig. 1. Impeller of the turbine.

Термічну обробку виливків виконували в газовій печі з робочими розмірами: ширина 4200 мм, довжина 7000 мм, висота 3000 мм. Спеціально встановлені арматури забезпечували рівномірне інтенсивне обдування виробу при охолодженні. Режим термічної обробки складався з нагріву до 1030-1040 °С, охолодження виливків зі швидкістю не менше 400 °С/год і відпуску при температурі 580-590 °С (рис. 2).

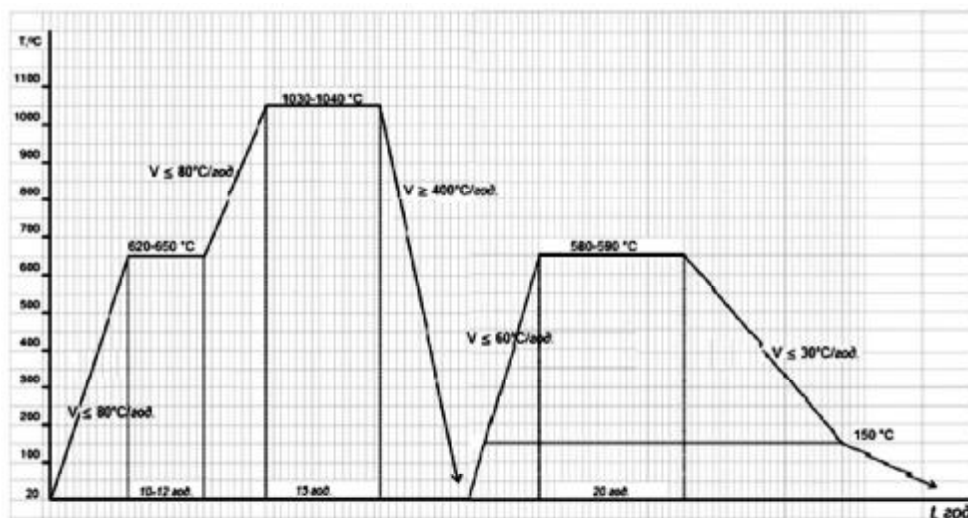


Рис. 2. Технологічна схема термічної обробки лопатей.

Fig. 2. Technological scheme of heat treatment of blades.

Хімічний склад досліджуваних лопатей у кількості 7 деталей відповідає складу сталі CA6-NM згідно ASTM A743/A743M-98a, %: C = 0,03 – 0,04 ($\leq 0,06$); Si = 0,20 – 0,47 ($\leq 1,00$); Mn = 0,28 – 0,84 ($\leq 1,0$); P = 0,014 – 0,025 ($\leq 0,04$); S = 0,010 – 0,017 ($\leq 0,03$); Cr = 11,97 – 13,45 (11,5-14,0); Ni = 3,54 – 3,98 (3,5-4,5); Mo = 0,48 – 0,50 (0,40-0,50).

Визначення показників рівня механічних властивостей виливків сталі проведене на металі приливних проб з боку вхідної і вихідної крайок лопатей демонструє їх відповідність вимогам, що забезпечують потрібну корозійно-втомну міцність виробів в процесі експлуатації (табл. 1)

Виконані виміри твердості на поверхні виливків (18 точок з рівним кроком 500 мм по довжині лопаті у центральній частині і бокових зонах робочої і тильної поверхонь) підтвердили незначний градієнт зміни її значень, одержаних на зразках виливних проб (рис. 3)

Мікроструктура сталі у термічно обробленому стані представлена мартенситом відпуску, розмір зерна відповідає 5-6 номеру (ДСТУ 8972:2019), вміст δ -фериту не перевищує 3% (рис. 4). Забрудненість металу глобулярними силікатними включеннями 2-3 балу (ДСТУ 8933:2019). Дендритна ліквіація у досліджуваних зразках виражена слабо.

При дослідженні макрозламів зразків після випробувань на ударний вигин спостерігали дрібнокристалічну будову в зоні стабільного росту тріщини і значні утяжини (бокові скоси) волокнистої будови. Дефектів металургійного переходження у макрозламах не виявлено.

В цілому результати проведених досліджень засвідчують доцільність запропонованого режиму термічної обробки лопатей гідротурбіни, що складається з нагріву до 1030-1040 °C з наступним інтенсивним охолодженням на повітрі зі швидкістю не менше 400 °C/год і високим відпуском при температурі 580-590°C. Це забезпечує необхідний рівень

Технічна інформація

Таблиця 1

Результати механічних випробувань лопатей робочого колеса

Table 1

Results of mechanical tests of impeller blades

№ лопаті	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	Ψ , %	КСУ, Дж/см ²	НВ
1	790-820	560-720	18,0-20,0	51,0-60,2	93-167	241-255
2	790-810	640-680	16,5-20,5	57,0-64,0	152-178	241-248
3	790	590-640	20,0-22,5	58,0-64,0	140-147	241
4	780-790	610-670	20,5- 25,0	57,0-65,0	140-162	241
5	800-820	620-710	19,0-23,0	60,0-64,0	167-182	248-255
6	790-830	630-740	19,5-21,5	56,0-60,0	124-165	241-255
7	760-780	600-690	16,0-20,0	64,0	145-175	235-241
Вимоги НД	≥ 755	≥ 550	≥ 15	≥ 35	≥ 50	235-285

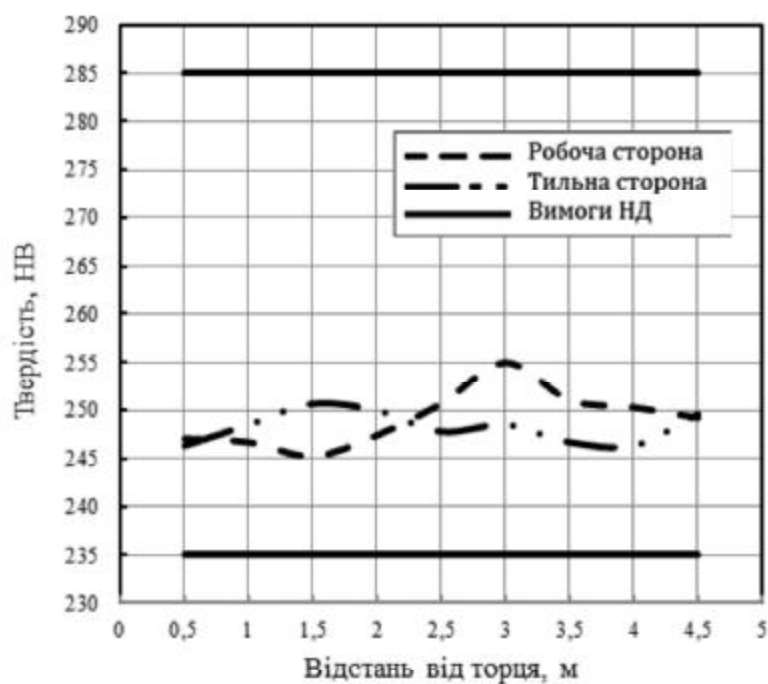


Рис. 3. Розподіл твердості по профілю лопаті.

Fig. 3. Distribution of hardness on the blade profile.

механічних властивостей масивних складнопрофільних литих лопатей гідротурбіни при збереженні, встановленої нормативною документацією, геометрії виробів.

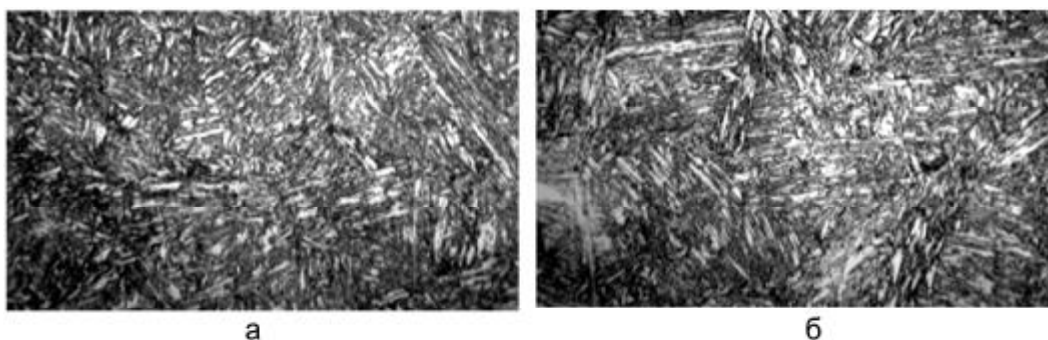


Рис. 4. Мікроструктура матеріалу лопаті (x400): а – вихідна кромка; б – вхідна кромка.

Fig. 4. Microstructure of the blade material (x400): a - starting edge; б - input edge.

Література

1. Двоеглазов Г.А. Материаловедение. – Киев: 2015. – 448с.
2. Кондратюк С.Є. Структуроутворення, спадковість і властивості литої сталі. – К.: Наук. думка, 2010. – 175 с.
3. Георгиевская Е. В. Энергетический подход к оценке динамических напряжений в гидротурбинах // Материаловедение. Энергетика. – 2017. – Т.23, № 4. – 89-97.
4. 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.
5. 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.
6. Колычев В.А. Моделирование кинематических характеристик проточной части гидротурбины // Вестник ХГПУ. – Харьков, 1998. – В. 21.
7. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение железоуглеродистых сплавов. – М: Машгиз, 1959 г.
8. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение и кавитационностойкие сплавы. – М: Металлургиздат, 1964г.
9. Тарасов В.Н. Физические механизмы кавитационной эрозии // Техническая акустика. – 2015. №. 3. – С. 2-10.
10. Георгиевская Е.В. Применение механики разрушений для прогнозирования ресурса радиально-осевых гидротурбин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – № 20 (9-10). – С. 71-78. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-71-78>
11. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1978. – 392 с.

References

1. Dvoyeglazov G.A. *Materialovedeniye* (Materials Science), Kyiv, 2015, 448 p. [in Russian].
2. Kondratyuk S.Ye. *Strukturuotvorenniya, spadkovist i vlastivosti litoi stali* (Structuralization, recession and power of cast steel), Kyiv, Nauk. dumka, 2010, 175 p. [in Ukrainian].

3. Georgiyevskaya Ye. V., *Materialovedeniye*. Energetika, 2017, Vol.23, No. 4, pp. 89-97 [in Russian].
4. Babachenko Yu. V., Avdyushenko A.Yu., *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2013, No. 4, pp. 547-55 [in Russian].
5. Lobareva I. F., Chernyy S. G., Chirkov D. V., Skorospelov V. A., Turuk P. A., *ZHVT*, 2006, Vol.11, No. 5, pp. 63-76 [in Russian].
6. Kolychev V. A. *Vestnik KHGPU*, 1998. – Vol. 21. [in Russian].
7. Bogachev I. N. *Kavitatsionnoye razrusheniye zhelezouglerodistykh splavov* (Cavitation destruction of iron-carbon alloys), Moscow: Mashgiz, 1959 p. [in Russian].
8. Bogachev I. N. *Kavitatsionnoye razrusheniye i kavitatsionnostoykiye splavy* (Cavitation destruction and cavitation-resistant alloys), Moscow: Metallurgizdat, 1964 p. [in Russian].
9. Tarasov V. N., *Tekhnicheskaya akustika*, 2015, No. 3, pp. 2-10 [in Russian].
10. Georgiyevskaya Ye. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2018, No. 20 (9-10), pp. 71-78. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-71-78>
11. Novikov I. I. *Teoriya termicheskoy obrabotki metallov* (Theory of heat treatment of metals), Moscow: Metallurgiya, 1978, 392 p. [in Russian].

Одержано 14.02.22

**Artomova S. V., Budarin O. S., Bondarenko V. S., Bezvesilna O. M.,
Ponomarenko O. I., Marchenko A. P., Akimov O. V., Mykhailiukov V. P.**

Heat treatment and properties of a cast complex profile blade of a hydroturbine

Summary

The mode of heat treatment of massive castings of the blades of the impeller of the hydroturbine "Dniester HPSP" from steel of the martensitic class CA-6NM has been worked out. Based on the determination of mechanical properties, measurements of stiffness over the entire surface of the blades and metallographic studies, the expediency of the proposed heat treatment mode using intensive cooling and high tempering after high-temperature austenitizing heating is shown. It is shown that this mode provides the necessary level of mechanical properties of blade castings, eliminates the negative effect of internal stresses arising during crystallization and rapid cooling during subsequent heat treatment. Determination of the chemical composition of castings and its compliance with the requirements of ASTM A743 /A743M-98a ensures that the required level of product properties is obtained. Metallographically established the absence of unwanted segregation and the uniformity of the structure, the uniformity of mechanical properties over the body of the blade, which leads to an increase in resistance to destruction due to cavitation.

As a result of the research, the expediency of using the following heat treatment mode for massive complex-profile castings of blades made of corrosion-resistant steel of martensitic class CA-6NM, consisting of heating to a temperature of 1030-1040 °C and tempering at 580-590 °C using rapid cooling, was confirmed.

Keywords: hydraulic turbine blades, heat treatment, structure, mechanical properties.