

С. В. ЕВДОКИМОВ  
А. А. ОРЛОВА

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБА ЗАЩИТЫ ОТ КАВИТАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ СООРУЖЕНИЙ ПРОТОЧНОГО ТРАКТА ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

CHOOSING THE OPTIMAL METHOD OF PROTECTION AGAINST CAVITATION  
DESTRUCTION OF STRUCTURES OF THE FLOW PATH OF HYDROPOWER PLANTS

*Рассматриваются способы защиты сооружений проточного тракта гидроэнергетических установок от кавитационных разрушений. В процессе эксплуатации необходимо периодически производить капитальный ремонт деталей проточной части гидравлической турбины. Используемая ранее облицовка листовой нержавеющей сталью деталей проточной части гидротурбин не дает существенного положительного результата, поэтому на ряде гидроэлектростанций стали применять электродугую наплавку лопастей рабочего колеса штучными электродами. Актуальным и перспективным является разработка новой технологии ремонтных работ и нового способа, обеспечивающего увеличение производительности наплавки и повышение ее качества, а также разработка соответствующего состава наплавочного материала. Рассмотрено несколько способов, проанализированы достоинства и недостатки каждого из них. Выбран оптимальный способ с использованием наплавки порошковой проволокой. Сделаны соответствующие выводы, даны рекомендации.*

**Ключевые слова:** сооружения проточного тракта, гидроэнергетические установки, гидравлическая турбина, кавитационные разрушения, кавитация, лопасть рабочего колеса турбины, механизированный способ наплавки металла, порошковая проволока

Как известно из практики эксплуатации гидравлических турбин, проточная часть гидротурбин подвергается кавитационным разрушениям. Износ деталей проточной части приводит к значительному снижению КПД турбины, резкому увеличению объема и стоимости ремонтных работ. Условия эксплуатации рабочих колес гидротурбин зависят от режима работы, конструкции турбин, устройства проточной части и наличия в воде абразивных частиц. В процессе эксплуатации необходимо периодически производить капитальный ремонт деталей проточной части гидротурбины. Обычно на действующих ГЭС ремонт производится

*The article discusses ways to protect the structures of the flow path of hydropower plants from cavitation damage. From the practice of operating hydraulic turbines, the flow part of hydraulic turbines is subjected to cavitation damage. During operation, it is periodically necessary to carry out major repairs of the parts of the flow part of the hydraulic turbine. The previously used stainless steel sheet cladding of the parts of the flow part of hydraulic turbines does not give a significant positive result, therefore, electric arc welding of the impeller blades with piece electrodes began to be used at a number of hydroelectric power plants. A large amount of repair work, low productivity and low quality of manual surfacing increase the duration of repairs. The development of a new technology and a new method to increase the productivity of surfacing and improve its quality, as well as the development of an appropriate composition of the surfacing material, is relevant and promising. Several methods are considered, the advantages and disadvantages of each of them are analyzed. The optimal method has been chosen using powder wire surfacing. The relevant conclusions and recommendations are given.*

**Keywords:** structures of the flow path, hydropower plants, hydraulic turbine, cavitation destruction, cavitation, turbine impeller blade, mechanized method of metal surfacing, powder wire

без демонтажа существующего оборудования. Ранее использованная облицовка листовой нержавеющей сталью деталей проточной части гидротурбин не дает существенного положительного результата, поэтому на ряде ГЭС стали применять электродугую наплавку лопастей рабочего колеса штучными электродами. Большой объем ремонтных работ, малая производительность и низкое качество ручной наплавки увеличивают продолжительность ремонта, а агрегаты, как правило, простаивают длительное время. Поэтому вполне актуальным и перспективным является разработка новой технологии и нового способа, обеспечивающе-

го увеличение производительности наплавки и повышение ее качества, а также разработка соответствующего наплавочного материала [1].

На сегодняшний день разработано несколько способов, один из них – это высокопроизводительный способ механизированной наплавки электронной лентой под флюсом. Сущность данного способа заключается в том, что в качестве электрода вместо проволоки применяется широкая лента малой толщины. При этом наплавка лопастей рабочего колеса производится на специальной установке, обеспечивающей поворот лопасти в положение, при котором наплавляемый участок лопасти располагается горизонтально. Однако этот способ невозможно применить при ремонте деталей проточной части гидротурбин, так как наплавку необходимо производить во всех пространственных положениях.

На ряде ГЭС проводилось опробование полуавтоматической наплавки в среде углекислого газа для ремонта камеры рабочего колеса гидротурбины. При этом применялась проволока *IX18NiOT* диаметром 1,2 мм, а также *Св-02×19Н9* диаметром 1,6 мм и *Св-04×19Н9* диаметром 2,0 мм. Однако и этот способ не нашел широкого применения из-за неудобства производить наплавку в условиях камеры рабочего колеса гидротурбины и из-за сравнительно малой производительности. Позже была опробована наплавка полуавтоматом А-765 порошковой проволокой ПП-1Х14Т-0 диаметром 2,8 мм. Однако опыт показал, что в этом случае получить в первом слое наплавленного металла больше 10 % хрома невозможно. Поэтому при данном способе не обеспечивается требуемая коррозионная и кавитационная стойкость наплавленного металла [2, 3].

Наилучшим образом показал себя способ наплавки порошковой проволоки на кавитационные участки с учетом коррозии, апробированный, к примеру, на Жигулевской ГЭС. При разработке состава наплавленного металла для этого способа был учтен многолетний опыт экс-

плуатации лопастей турбины, изготовленных из различных сталей. Хорошие результаты при работе в этих условиях показали высокохромистые стали. Так, лопасти гидротурбин, отлитые из стали типа 2Х13(20Х14НЛ), после 6–8 лет работы на Жигулевской ГЭС были в хорошем состоянии, кавитационных и коррозионных разрушений практически не было обнаружено. Опыт эксплуатации также подтвердил, что кавитационное разрушение деталей гидротурбин практически отсутствует, если материал содержит не менее 12 % хрома [4, 5].

Более подробно остановимся на рассмотрении данного способа. Для упрощения задачи по выбору состава наплавленного металла вначале были изготовлены опытные порошковые проволоки для наплавки под флюсом. Было изготовлено 6 составов проволоки: 10Х14; 20Х14; 30Х14; 10Х14Н1; 20Х14Н2; 30Х14Н3 с диаметром 2,8 мм. На лабораторной установке производили наплавки на пластины размером 350×350×14 из стали. Из наплавленных пластин одномеханическим способом вырезали заготовки, из которых затем изготавливали образцы для использования на кавитацию, металлографические исследования и спектральный анализ. В табл. 1 приведены результаты спектрального анализа наплавленного металла.

Из табл. 1 видно, что состав наплавленного металла в третьем слое близок к заданному значению. Далее были изготовлены шлифы и определена твердость наплавленного и основного металла. Результаты замеров твердости представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что с увеличением содержания углерода в наплавленном металле твердость значительно повышается. Так, при содержании 0,12 % С, средняя твердость составляет *HRB90*, а при 0,32 % С – *HRB104*. Тенденция роста твердости больше у металла, легированного хромом, чем совместно легированного хромом и никелем. Лабораторные испытания показали, что чем выше твердость металла, тем более

Таблица 1. Результаты спектрального анализа наплавленного металла  
Table 1. Results of spectral analysis of deposited metal

Маркировка проволоки	Наплавленный металл, 3-й слой, %		
	С	Cr	Ni
10Х14	0,12	16,0	-
20Х14	0,30	13,5	-
30Х14	0,32	13,0	-
10Х14 Н1	0,15	16,0	1,5
20Х14 Н2	0,17	15,0	2,5
30Х14 Н3	0,36	16,0	3,2

Таблица 2. Результаты замеров твердости наплавленного и основного металла  
Table 2. Results of hardness measurements of deposited and base metal

Состав наплавленного металла, 3-й слой, %					
0,12 С	0,30 С	0,32 С	0,15 С	0,17 С	0,36 С
16,0 Cr	13,5 Cr	13,0 Cr	15,0 Cr	15,0 Cr	16,0 Cr
			1,5 Ni	2,5 Ni	3,2 Ni
Твердость НВ					
85,5	101,5	113,2	76,5	104,0	100,0
91,5	105,5	115,0	97,6	106,6	102,5
92,3	108,0	114,0	99,3	106,6	103,7
97,7	115,0	114,4	100,0	104,0	100,0
108,0	111,5	115,5	100,0	103,3	111,0
95,0	90,5	114,5	76,0	105,7	106,0
91,7	72,0	78,5	77,5	74,3	84,0
77,5	78,5	78,5	83,2	70,6	76,2
84,5	83,5	73,0	-	70,0	73,0

высокая его кавитационная скорость. Если основываться на этих исследованиях, то следует вводить в наплавленный металл максимально возможное содержание углерода. Однако известно, что с увеличением содержания в металле углерода коррозионные свойства его резко снижаются. Поэтому содержание углерода должно быть ограничено. Для улучшения пластических свойств в наплавленный металл вводят 1,5–2,2 % Ni.

В результате исследования был выбран оптимальный состав металла для порошковой проволоки: 13–16 % Cr; 1,5–2,2 % Ni; 0,1–0,3 % Ti; 0,10–0,12 % С. При разработке на Жигулевской ГЭС данного состава порошковой проволоки учитывался многолетний опыт разработки и изготовления порошковой проволоки других составов. Задача состояла в том, чтобы разработать состав порошковой проволоки, которая обеспечила бы получение заданного состава металла в первом слое. Кроме того, должна обеспечиваться наплавка во всех пространственных положениях, так как детали проточного тракта гидротурбин наплавляются без монтажа. Таким образом, было установлено, что в порошковую проволоку надо вводить хрома не менее 17 %, а никеля – порядка 2 %. Шлако- и газообразующая часть сердечника проволоки состояла из рутила, мрамора и пластикового шпата. Наплавка опытных образцов показала, что при суммарном содержании их в проволоке менее 10 % в наплавленном металле образуются поры. В качестве раскислителей применялся титан и алюминий. В сердечник проволоки вводился ферротитан из расчета

содержания титана в проволоке не более 0,5 %, тогда как при большом содержании титана ухудшалось формирование наплавленного металла и отделимость шлаковой корки [6–9].

Данные металлографических исследований наплавленного металла с разным содержанием никеля приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что наиболее высокую твердость НВ 352–363 имеют образцы X15H6T, на втором месте по твердости образцы X15H2T – НВ 277–285. Наиболее низкую твердость НВ 121–142 показали образцы с однофазной структурой.

В итоге это позволило установить оптимальный состав порошковой проволоки, обеспечивающий наплавку на вертикальной плоскости заданного состава металла в первом наплавленном слое. После обработки состава порошковой проволоки в наплавленном металле не наблюдалось пор и других дефектов.

Особое внимание следует уделить технике полуавтоматической наплавки порошковой проволоки во всех пространственных положениях, которая осуществлялась шланговым полуавтоматом. Это позволит устранить стекание жидкого металла и другие трудности наплавки на вертикальную поверхность при ремонте камер рабочего колеса гидротурбины. Хорошие результаты были получены при наплавке проволоки диаметром 2,0 мм. Для увеличения производительности необходимо было отработать технику наплавки проволокой большего диаметра, в результате наиболее оптимальным был выбран диаметр 2,8 мм. Известно, что наплавка в потолочном положении сопряжена с большими трудностями,

Таблица 3. Данные металлографических исследований наплавленного металла  
Table 3. Metallographic data of deposited metal

Маркировка образцов	Состав наплавленного металла, %	Микротвердость $U_{\mu}$	Твердость $HB$
X15	16 Cr	124,149 – 248,234	187,197
X15H	15 Cr; 1,5 Ni	162,149 – 344,366,288	207,197
X15H2T	13 Cr; 2,1 Ni; 0,28 Ti	212,222,222.212	285,277
АНЗ+X15H2T	15 Cr; 2,4 Ni; 0,38 Ti	184,162,170	–
X15H6T	14,9 Cr; 7,0 Ni; 0,1 Ti	272,248,272	363,352
X13H10	11,5 Cr; 9,0 Ni	184 – 194	143,143
X15H12	13,4 Cr; 11,3 Ni	155 – 184	137,143
X15H15	15,2 Cr; 16,0 Ni	149 – 155	126,121

чем наплавка на вертикальную поверхность. В этом случае требуется осуществлять перенос расплавленного металла проволоки снизу вверх, тем самым получать надежное сплавление с основным металлом.

**Выводы.** 1. Представленный состав кавитационно-коррозионного металла для порошковой проволоки для наплавки на сооружениях прочной части гидротурбины является оптимальным по составу.

2. Технология и техника механизированной наплавки порошковой проволоки на вертикальной плоскости обеспечивает хорошую производительность и улучшение качества восстановительной наплавки.

3. Данный способ является оптимальным в практике эксплуатации гидравлических турбин, поскольку минимизированы риски возникновения кавитационных разрушений в прочной части турбины.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романов А.А. Жигулевская ГЭС. Эксплуатация гидротехнических сооружений. Самара: Издательский дом «Агни», 2010. 360 с. Кн. I.
2. Романов А.А. Жигулевская ГЭС. Эксплуатация гидромеханического оборудования. Самара: Издательский дом «Агни», 2011. 424 с. Кн. II.
3. Бальзанников М.И., Зубков В.А., Кондратьева Н.В., Хуртин В.А. Комплексное обследование технического состояния строительных конструкций сооружений Жигулевской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2013. № 6. С. 21–27.
4. Евдокимов С.В., Селиверстов В.А. Исследование лопастей рабочего колеса гидравлической турбины // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство: сб. статей. Самара: СамГТУ, 2019. С. 333–338.
5. Романов А.А., Евдокимов С.В., Селиверстов В.А. Изучение процесса эрозии на лопастях рабочих ко-

лес Жигулевской гидроэлектростанции // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8. № 2 (31). С. 56–59. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.02.9.

6. Бальзанников М.И., Иванов Б.Г., Михасек А.А. Система управления состоянием гидротехнических сооружений // Вестник МГСУ. 2012. № 7. С. 119–124.

7. Balzannikov M.I., Vyshkin E.G. Hydroelectric power plants reservoirs and their impact on the environment. Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 8-th International Scientific and Practical Conference. 2011. V. 1. P. 171–174.

8. Свитала Ф., Галицкова Ю.М. Использование гидравлических энергоагрегатов с наклонной осью для малых ГЭС // Научное обозрение. 2014. № 10 (2). С. 450–456.

9. Dormidontova T.V. Operational safety assessment of stadium stands. Procedia Engineering XXIV R-S-P seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering. 2015.

## REFERENCES

1. Romanov A.A. Zhigulevskaja GJeS. Jekspluatacija gidrotehničkih sooruzhenij [Zhigulevskaya HPP. Operation of hydraulic structures]. Samara, Publishing house "Agni", 2010. 360 p.
2. Romanov A.A. Zhigulevskaja GJeS. Jekspluatacija gidromehaničeskogo oborudovanija [Zhigulevskaya HPP. Operation of hydromechanical equipment]. Samara, Agni Publishing House, 2011. 424 p. Pr. II.
3. Balzannikov M.I., Zubkov V.A., Kondratyeva N.V., Khurtin V.A. Comprehensive examination of the technical condition of building structures of the Zhigulevskaya HPP structures. Gidrotehničeskoe stroitel'stvo [Hydraulic Engineering Construction], 2013, no. 6, pp. 21–27. (in Russian)
4. Evdokimov S.V., Seliverstov V.A. Study of impeller blades of hydraulic turbine. Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arhitekture. Stroitel'stvo: sb. statej [Traditions and innovations in construction and architecture. Construction: Sat. articles]. Samara, SamSTU, 2019, pp. 333–338. (In Russian).
5. Romanov A.A., Evdokimov S.V., Seliverstov V.A. Study of erosion process on impeller blades of

Zhigulevskaya hydroelectric power station. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2018, vol. 8, no. 2(31), pp. 56–59. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2018.02.9

6. Balzannikov M.I., Ivanov B.G., Mikhasek A.A. Hydraulic structures condition management system. *Vestnik MGSU* [MGSU Bulletin], 2012, no. 7, pp. 119–124. (in Russian)

7. Balzannikov M.I., Vyshkin E.G. Hydroelectric power plants reservoirs and their impact on the environment. Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 8-th International Scientific and Practical Conference. 2011. V. 1. P. 171–174.

8. Svitala F., Galitskova Yu.M. The use of hydraulic power units with an inclined axis for small hydroelectric power plants. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2014, no. 10(2), pp. 450–456. (in Russian)

9. Dormidontova T.V. Operational safety assessment of stadium stands. *Procedia Engineering XXIV R-S-P seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering*, 2015.

Об авторах:

**ЕВДОКИМОВ Сергей Владимирович**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой природоохранного и гидротехнического строительства Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: sali5@mail.ru

**EVDOKIMOV Sergey V.**

PhD of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Nature Protection and Hydrotechnical Construction Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244 E-mail: sali5@mail.ru

**ОРЛОВА Алла Алексеевна**

старший преподаватель кафедры природоохранного и гидротехнического строительства Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: allaorlova5@mail.ru

**ORLOVA Alla A.**

Senior Lecturer of the Nature Protection and Hydrotechnical Construction Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244 E-mail: allaorlova5@mail.ru

Для цитирования: Евдокимов С.В., Орлова А.А. Выбор оптимального способа защиты от кавитационного разрушения сооружений проточного тракта гидроэнергетических установок // Градостроительство и архитектура. 2025. Т. 15, № 3. С. 18–22. DOI: 10.17673/Vestnik.2025.03.02.

For citation: Evdokimov S.V., Orlova A.A. Choosing the optimal method of protection against cavitation destruction of structures of the flow path of hydropower plants. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2025, vol. 15, no. 3, pp. 18–22. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2025.03.02.

Принята: 22.05.2025 г.