

СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЛОПАТКИ, УПРОЧНЕННОЙ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Д.Б. Глушкова, Е.Д. Гринченко, И.Н. Никитченко
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
Харьков, Украина

Представлены результаты исследования структуры и механических характеристик поверхностного слоя входной кромки лопатки 5 ступени ротора низкого давления, упрочненной токами высокой частоты. Выполнено металлографическое исследование, показано распределение микротвердости по глубине слоя, проведено исследование изменения нанотвердости поверхности, определены остаточные напряжения по глубине упрочненного слоя натурной лопатки. Результаты наноиндентирования коррелируют со значениями микротвердости. Предложенная обработка токами высокой частоты обеспечивает достаточно высокую твердость поверхности и сжимающие напряжения в поверхностном слое, повышает долговечность детали в условиях усталостного нагружения. Полученные данные имеют практическое применение в определении показателей качественных характеристик упрочненного слоя при изготовлении лопаток паровых турбин.

ВВЕДЕНИЕ

В комплексе вопросов, определяющих надежность и экономичность работы турбин тепловых и атомных электростанций, большое значение имеет надежность лопаточного аппарата – наиболее дорогого и часто повреждаемого элемента турбин. Условия их работы требуют повышенной твердости входных кромок и высокой эрозионной стойкости, отсутствия негативного влияния параметров формирования защитного покрытия на механические свойства, высоких коррозионных свойств [1].

Особенно остро эта проблема стоит для рабочих лопаток последних ступеней цилиндров низкого давления, эрозионный износ которых во многом определяет ресурс их работы.

Одним из путей снижения эрозионного износа рабочих лопаток является повышение эффективности антиэрозионных свойств вследствие упрочнения входных кромок. В данной работе приведены результаты исследований состояния поверхностного слоя рабочей лопатки паровой турбины из стали 15X11МФ, упрочненной токами высокой частоты (ТВЧ) для повышения эрозионной стойкости и увеличения ресурса работы.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проблема эрозионно-коррозионного повреждения рабочих лопаток, испытывающих при эксплуатации воздействие сложного спектра малоцикловых и высокочастотных термомеханических нагрузок, актуальна более 70 лет [2–5], но до настоящего времени она решена частично, поэтому исследование в области упрочнения материала лопаток по-прежнему являются важным аспектом в решении этой задачи. Поверхностная закалка с нагревом ТВЧ относится к числу наиболее распространенных и эффективных способов упрочнения деталей.

Особенностью индукционного нагрева металлов является генерирование тепловой энергии непосредственно в изделии. Это вносит

определенные коррективы в кинетику нарастания температуры поверхности и в распределение температуры по сечению изделия [6].

В большинстве случаев наибольшие рабочие напряжения в деталях машин проявляются в поверхностных слоях. По мере удаления от поверхности напряжения постепенно уменьшаются и исчезают в центральной части изделия. При нагружении изделия знакопеременной нагрузкой разрушение от усталости начинается в поверхностном слое.

Наибольшая поверхностная прочность при достаточно вязкой сердцевине и плавном переходе между ними создает наиболее рациональное сочетание свойств. Степень плавности перехода от упрочненного поверхностного слоя к неупрочненной сердцевине оказывает большое влияние на эксплуатационные качества изделий [7].

Авторы работы ставили перед собой задачу исследовать состояние поверхностного слоя рабочей лопатки паровой турбины из стали 15X11МФ, упрочненной ТВЧ.

Образцы для исследования изготавливали из стали 15X11МФ, используемой для изготовления штампованных лопаток 5 ступени ротора низкого давления. Их подвергали термообработке согласно ГОСТ 108.020.03 на КП70. Механические свойства материала исходных образцов приведены в табл. 1.

Поверхностную закалку входных кромок лопаток 5 ступени выполняли на установке ВЧИ-63/044-3П-ЛО1 при следующих технологических параметрах:

- а) рабочая частота тока – 440 кГц;
- б) анодный ток генераторных ламп – 2,5...3,5 А;
- в) ток сетки генераторных ламп – 0,5...1,5 А;
- г) анодное напряжение генераторных ламп – 3,0...5,0 кВ.

Данный режим обеспечивает температуру закалки 1050...1150 °С. Охлаждали лопатки водой с помощью разбрызгивающего устройства. При поверхностной закалке стремились получить слой определенной глубины со структурой бесструктурного мартенсита. Для этого на

необходимой глубине должна достигаться температура полной аустенизации стали. Кроме того, избегали получения сквозной прокаливаемости детали. На рабочих лопатках после закалки ТВЧ необходимо получить глубину слоя на ребре

1...3 мм, на поверхности наружного профиля – 0,5...1 мм. Данная глубина слоя обеспечивает повышение эрозионной стойкости по сравнению с лопаткой, термообработанной по режиму: закалка от температуры 1050 °С, отпуск при 680 °С.

Таблица 1

Механические свойства исследованных лопаток

Свойства	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	δ_5 , %	Ψ , %	КСУ, Дж/см ²	НВ, МПа
Результаты испытаний	669...750	827...900	15...20	54...58	74...116	248...271
Требования ГОСТ 108.020.03-82	666,4...813,4	≥814	–	≥40	≥39,2	248...285

Качество поверхностной закалки ТВЧ кромок лопаток оценивали измерением микротвердости по глубине закаленного слоя, изучением структурного состояния, оценкой распределения остаточных напряжений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование проводили на шести образцах, вырезанных в различных сечениях лопатки в поперечном направлении (рис. 1).

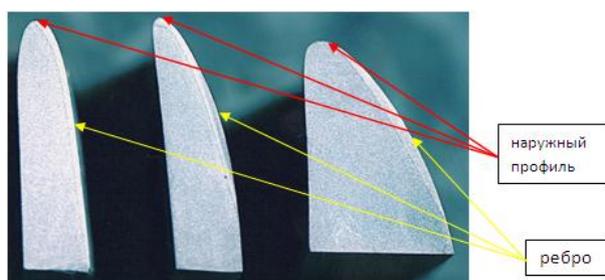


Рис. 1. Вид поперечных образцов для исследования (увеличение $\times 1,2$)

Глубина закаленного слоя образцов, замеренная по фону травления на поперечных шлифах стандартно вырезанных образцов, приведена в табл. 2.

Структура поверхностного слоя лопатки, упрочненной закалкой, имеет плавный переход от поверхности к сердцевине.

стабильно. На участке наружного профиля образцов №5, 6 слой отсутствует. Данные образцы вырезаны из лопатки вблизи бандажного отверстия.

Формирование структуры, как и распределение микротвердости, зависит от нескольких факторов, основные из которых: распределение температуры в поверхностной зоне до конца нагрева, исходная структура, закаляемость стали, условия охлаждения.

Микроструктура металла лопатки после объемной термической обработки представляет собой сорбит с ориентацией по мартенситу (рис. 2). Игольчатость мартенсита соответствует 9–10 баллу ГОСТ 8233-56. Данный мартенсит является малоуглеродистым и характеризуется как крупноиглочатый.



Рис. 2. Микроструктура металла лопатки после объемной термической обработки (увеличение $\times 100$)

Таблица 2
Глубина закаленного слоя исследованных образцов

Номер образца	Глубина слоя, мм	
	наружного профиля	ребра
1	0,8	3,0
2	0,9	2,6
3	0,7	0,9
4	0,6	0,6
5	0,0	1,5
6	0,0	1,5

Согласно данным, приведенным в табл. 2, значения глубины закаленного слоя образцов значительно отличаются между собой, что обусловлено сложной конфигурацией профиля лопатки и, как результат, различным зазором между телом лопатки и индуктором, в результате чего тепловложение по сечению лопатки также не

После поверхностной закалки ТВЧ с оптимальных температур микроструктура закаленного слоя состоит из бесструктурного или безиглочатого мартенсита (рис. 3), что обеспечивает существенное повышение прочности, пластичности и вязкости слоя. По мере удаления от поверхности структура укрупняется вплоть до состояния основного металла лопатки.

Измерения микротвердости по глубине закаленного слоя были выполнены на образцах, вырезанных из лопаток 5 ступени ротора низкого давления. Их проводили на приборе ПМТ-3 при нагрузке 50 г.

Распределение микротвердости по глубине закаленного слоя показано в виде графиков на рис. 4, 5.

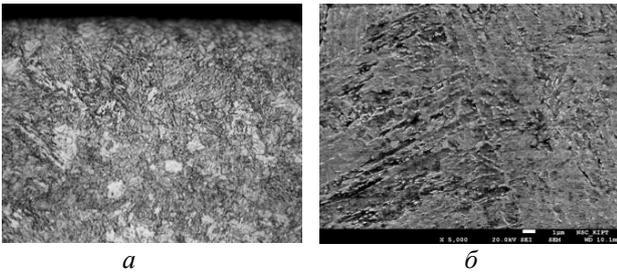


Рис. 3. Микроструктура упрочненного слоя при увеличении: а – $\times 100$ и б – $\times 5000$

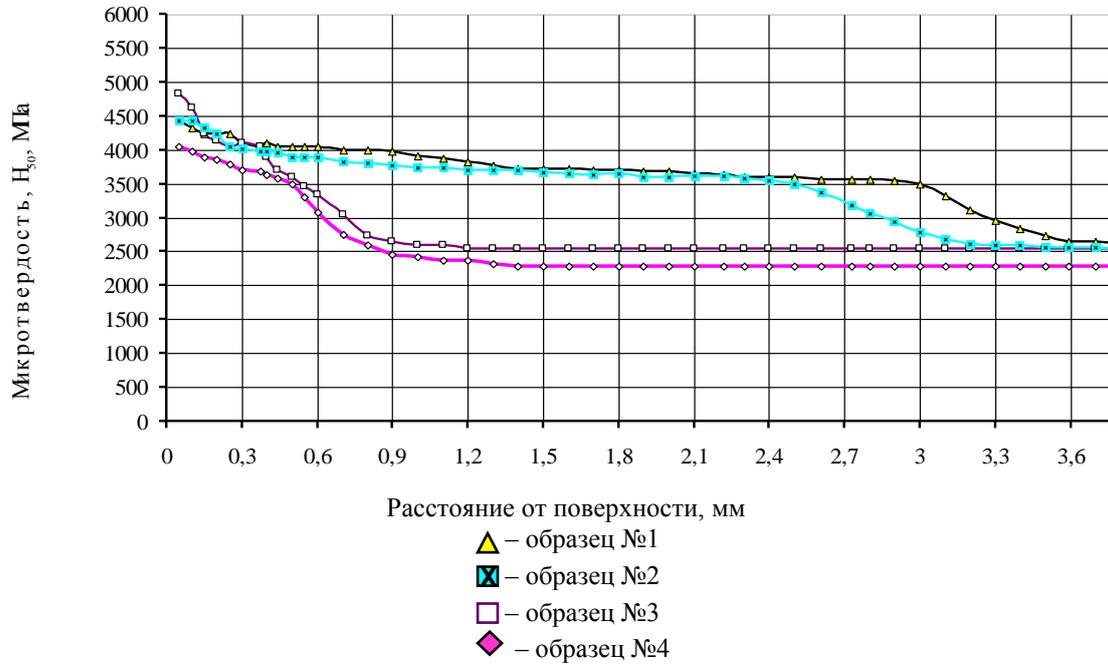


Рис. 4. Распределение микротвердости от поверхности до сердцевины по наружному профилю лопатки

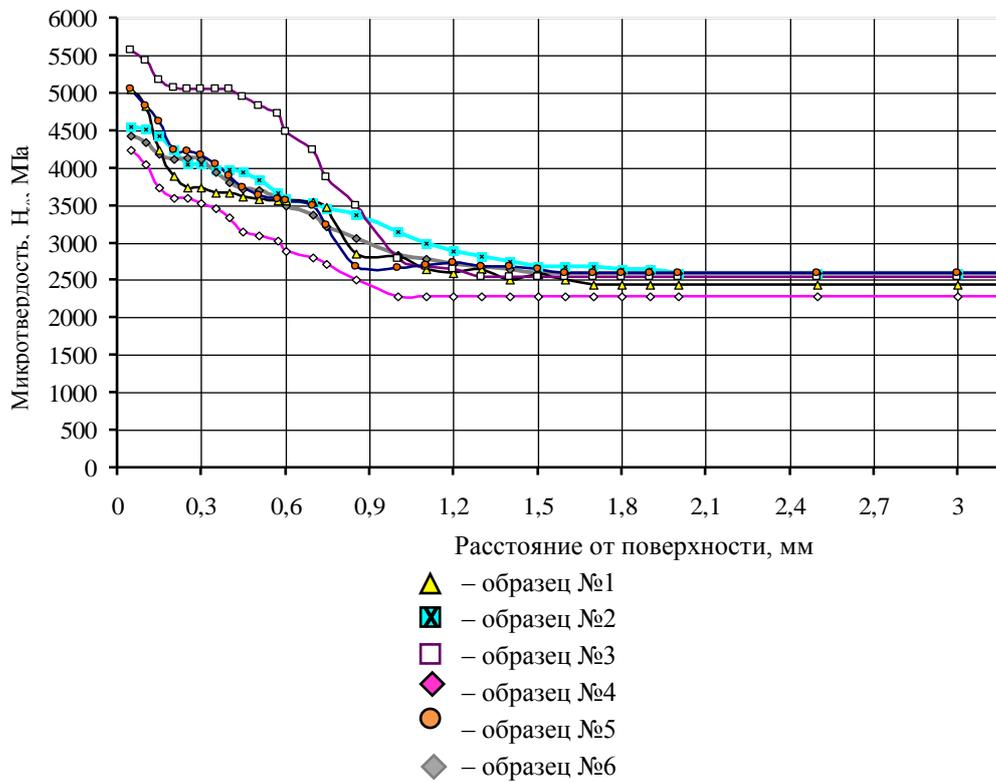


Рис. 5. Распределение микротвердости от поверхности до сердцевины по ребру лопатки

Выбранный режим поверхностной закалки с нагревом ТВЧ обеспечил глубину закаленного слоя 0,6...3,0 мм. Условная граница глубины закаленного слоя, установленная измерением микротвердости, составляет 3300...3500 МПа, что соответствует глубине закаленного слоя, определенной после травления, на 90...100%.

Образцы, на которых глубина слоя максимальна, имеют более плавное падение микротвердости по глубине закаленного слоя по сравнению с образцами, имеющими минимальную глубину слоя 0,6 мм. В поверхностной зоне образцов микротвердость имеет максимальное значение на уровне 5600 МПа.

Были проведены испытания основных наномеханических свойств образца стали после обработки ТВЧ. Наноиндентирование проводили трехгранным индентором Берковича на нанотвердомере Nano Indenter G200 производства Nano Instrument Innovation Center, Oak Ridge, TN, USA.

Испытания проводили по глубине шлифа от внешней границы образца к центру. Исследовали область зоны после обработки ТВЧ. Наносили не меньше 20 отпечатков на расстоянии 50 мкм друг от друга. Первую точку наносили в 50 мкм от края образца. Нагрузка на индентор составляла 30 мН, глубина индентирования при этом была порядка 500 нм. Для нахождения твердости и модуля упругости применялась методика Оливера и Фарра.

Результаты испытаний стали ТВЧ от края к центру приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты наноиндентирования

Расстояние от поверхности лопатки, мкм	Твердость, МПа	Модуль Юнга, ГПа
1. 50	—	—
2. 100	5693	231,556
3. 150	5693	231,556
4. 200	5946	228,136
5. 250	5909	224,831
6. 300	5729	243,915
7. 350	5804	230,117
8. 400	5724	231,218
9. 450	5747	236,222
10. 500	3512	190,494
11. 550	5588	248,881
12. 600	5,511	243,706
13. 650	5,66	243,437
14. 700	3,783	238,907
15. 750	4,225	225,022
16. 800	4,476	251,423
17. 850	4,166	226,672
18. 900	3,657	248,519
19. 950	3,635	242,899
20. 1000	3,706	226,622
21. 1500	3,585	238,87
22. 2000	3,812	229,934

Результаты наноиндентирования коррелируют со значениями микротвердости.

При упрочнении ТВЧ необходимо получить на поверхности лопатки сжимающие напряжения, так как растягивающие остаточные напряжения отрицательно влияют на усталостную прочность.

Нагреваясь, поверхностный слой лопатки расширяется в сторону свободной поверхности, испытывая пластическую деформацию. В первый период охлаждения после закалки в поверхностном слое возникают растягивающие напряжения, и происходит пластическая деформация горячего металла. При этом внутренние напряжения частично снимаются. При дальнейшем охлаждении пластическая деформация останавливается, и этот слой растягивается, вызывая в сердцевине значительные сжимающие напряжения. В некоторый момент внешняя поверхность нагретого слоя перестает сокращаться и деформируется (сжимается) только под влиянием внутренней части нагретого слоя. Растягивающие напряжения на поверхности уменьшаются, и их максимум перемещается в глубину металла. При достаточно большой глубине нагретого слоя (более 3 мм) остаточные напряжения на поверхности закаленного слоя полностью переходят в сжимающие.

Величина тепловых сжимающих напряжений тем больше, чем глубже нагретый ТВЧ слой. Основной причиной возникновения растягивающих остаточных напряжений вблизи твердого слоя являются тепловые объемные пластические деформации в процессе нагрева и охлаждения.

Выполнены исследования по влиянию поверхностной закалки ТВЧ и последующего отпуска на уровень и характер распространения остаточных напряжений на входной кромке рабочих лопаток 5 ступени ротора низкого давления паровой турбины. Результаты замеров, выполненные методом рентгеновской тензометрии, показаны на рис. 6.

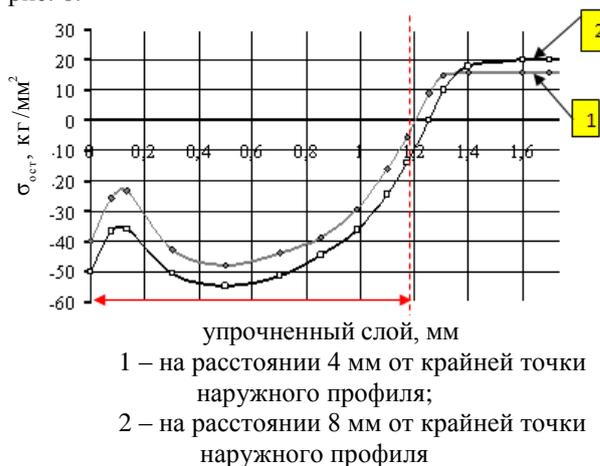


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений по глубине лопатки

Как видно из рис. 6, непосредственно в самом закаленном слое по всей его глубине действуют сжимающие остаточные напряжения (до 55 кг/мм²). На рубеже закаленного слоя с незакаленным металлом остаточные сжимающие напряжения

перерастают в растягивающие (до 14...20 кг/мм²), которые, однако, не носят пикового характера, а равномерно распространяются в глубь лопатки.

Таким образом, распространение остаточных напряжений как по поверхности лопатки, так и по ее глубине после закалки с нагревом ТВЧ в целом носит благоприятный характер.

ВЫВОДЫ

1. Исследована микроструктура и микротвердость после поверхностной закалки с нагревом ТВЧ и последующего отпуска. Выбранный режим поверхностной закалки с нагревом ТВЧ обеспечил глубину закаленного слоя 0,6...3,0 мм.

2. Распределение микротвердости от поверхности до сердцевины образцов носит плавный характер. На поверхности закаленного слоя наблюдаются максимальные значения микротвердости, по мере удаления в глубь металла они снижаются до значений микротвердости сердцевины.

3. Максимальные значения микротвердости получены на ребре лопатки – $H_{50} = 5560$ МПа, на наружном профиле – $H_{50} = 4830$ МПа.

4. Установлено, что в закаленном слое действуют сжимающие остаточные напряжения. Распределение остаточных напряжений по глубине лопатки после закалки с нагревом ТВЧ носит благоприятный характер.

Авторы выражают благодарность Г.Н. Толмачевой за оказанную помощь при выполнении исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.Г. Субботин, Е.В. Левченко. *Повышение эффективности турбинных установок тепловых электростанций*. М.: «Теплоэнергетика», 2009, с. 256-350.

2. М.К. Смылова. Исследование и разработка комбинированных ионно-плазменных технологий, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств лопаток газовых и паровых турбин // *Вестник УГАТУ*. 2004, №3(11), с. 45-51.

3. А.В. Беляков. Практика формирования электроискровых покрытий для упрочнения и восстановления лопаточного аппарата проточной части паровых турбин тепловых и атомных электростанций // *Вестник ИГЭУ*. 2008, №6, с. 24-32.

4. В.Л. Швецов. Комбинированная противоэрозионная защита рабочих лопаток последних ступеней мощных паровых турбин // *Вестник НТУ ХПИ*. 2014, №13(1056), с. 25-32.

5. И.П. Фадеев. *Эрозия влажнопаровых турбин*. Л.: «Машиностроение», 1974, с. 235-301.

6. Г.Ф. Головин, Н.Ф. Зимин. *Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева*. Л.: «Машиностроение», 1990, с. 27-35.

7. Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. *Материаловедение*. М.: «Машиностроение», 1990, с. 265-280.

Статья поступила в редакцию 12.12.2017 г.

СТРУКТУРНИЙ СТАН І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ЛОПАТКИ, ЗМІЦНЕНОЇ СТРУМАМИ ВИСОКОЇ ЧАСТОТИ

Д.Б. Глушкова, О.Д. Грінченко, І.М. Нікітченко

Представлено результати дослідження структури і механічних характеристик поверхневого шару вхідної кромки лопатки 5 ступеня ротора низького тиску, зміцненої струмами високої частоти. Виконано металографічні дослідження, показано розподіл микротвердості по глибині шару, проведено дослідження зміни нанотвердості поверхні, визначено залишкові напруження по глибині зміцненого шару натурної лопатки. Результати наноідентифікації корелюють зі значеннями микротвердості. Запропонована обробка струмами високої частоти забезпечує досить високу твердість поверхні і стискуючі напруження в поверхневому шарі, підвищує довговічність деталі в умовах втомного навантаження. Отримані дані мають практичне застосування у визначенні показників якісних характеристик зміцненого шару при виготовленні лопаток парових турбін.

STRUCTURAL STATE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE SURFACE LAYER OF THE BLADE, HARDENED BY HIGH-FREQUENCY CURRENTS

D.B. Glushkova, E.D. Grinchenko, I.N. Nikitchenko

The paper presents the results of a study of the structure and mechanical characteristics of the surface layer of the leading edge of the blade of stage 5 of the low-pressure rotor, hardened by high-frequency currents. A metallographical study was performed, the microhardness distribution over the bed depth was shown, the nanohardness of the surface was studied, residual stresses were determined from the depth of the hardened layer of the natural blade. The results of nanoindentification correlate with the values of microhardness. The proposed heat treatment with high-frequency currents provides a sufficiently high hardness surfaces and compressive stresses in the surface layer, increases the durability of the part under conditions of fatigue loading. The data obtained have practical application in the determination of the parameters of the qualitative characteristics of the hardened layer in the manufacture of steam turbine blades.