

УДК 621.785

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЛОПАТКИ ИЗ СТАЛИ 15X11МФ, УПРОЧНЕННОЙ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Д.Б. Глушкова, проф., д.т.н., Е.Д. Гринченко, соискатель,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

*Аннотация.* Представлены результаты исследования структуры и механических характеристик поверхностного слоя входной кромки лопатки из стали 15X11МФ, упрочненной токами высокой частоты. Полученные данные имеют практическое применение в определении показателей качественных характеристик упрочненного слоя при изготовлении лопаток паровых турбин.

*Ключевые слова:* упрочнение, лопатка, микроструктура, сталь.

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНОГО СТАНУ Й МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ЛОПАТКИ ЗІ СТАЛІ 15X11МФ, ЗМІЦНЕНОЇ СТРУМАМИ ВИСОКОЇ ЧАСТОТИ

Д.Б. Глушкова, проф., д.т.н., О.Д. Гринченко, здобувач,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* Представлені результати дослідження структури й механічних характеристик поверхневого шару вхідної кромки лопатки зі сталі 15X11МФ, зміцненої струмами високої частоти. Отримані дані мають практичне застосування у визначенні показників якісних характеристик зміцненого шару у процесі виготовлення лопаток парових турбін.

*Ключові слова:* зміцнення, лопатка, микроструктура, сталь.

## INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL STATE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE BLADE LAYER MADE OF 15X11MФ STEEL REINFORCED BY HIGH-FREQUENCY CURRENTS

D. Glushkova, Prof., D. Sc. (Eng.), O. Hrynchenko, comp.,  
Kharkiv National Automobile and Highway University

*Abstract.* The results of studying the structure and mechanical characteristics of the surface layer of the leading edge of the blade made of 15X11MФ steel hardened by high-frequency currents are presented. The data obtained are of practical use in determination of parameters of qualitative characteristics of a hardened layer in the manufacture of blades of steam turbines.

*Key words:* hardening, blade, microstructure, steel.

### 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

кромки 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 за счет упрочнения входных кромок. В данной работе приведены результаты исследований состояния поверхностного слоя рабочей лопатки паровой турбины из стали 15X11МФ, упрочненной токами высокой частоты для повышения эрозионной стойкости и увеличения ресурса работы.

### Анализ публикаций

Насколько известно из публикаций [2–5], проблема эрозионно-коррозионного повреждения рабочих лопаток, испытывающих при эксплуатации воздействие сложного спектра малоцикловых и высокочастотных термомеханических нагрузок, актуальна более 70 лет, но до настоящего времени она решена частично, поэтому исследования в области упрочнения материала лопаток по-прежнему являются важным аспектом в решении этой задачи.

### Цель и постановка задачи

Изучить состояние поверхностного слоя рабочей лопатки паровой турбины из стали 15X11МФ, упрочненной токами высокой частоты.

### Результаты исследований и их обсуждение

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].

Образцы для исследования изготавливали от штампованной лопаток, термообработанных согласно ОСТ 108.020.03 на КП70. Механические свойства материала исходных образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1 Механические свойства исследованных лопаток

Свойства	Результаты испытаний	Требования ОСТ 108.020.03-82
$\sigma_{0,2}$ , МПа	669–750	666,4–813,4
$\sigma_B$ , МПа	827–900	$\geq 814$
$\delta_5$ , %	15–20	
$\Psi$ , %	54–58	$\geq 40$
КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	74–116	$\geq 39,2$
НВ, МПа	248–271	248–285

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

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

Данный режим обеспечивает температуру закали 1050–1150 °С. Охлаждение лопаток осуществляли водой с помощью разбрызгивающего устройства.

При поверхностной закалке стремились получить слой определенной глубины со структурой бесструктурного мартенсита. Для этого на необходимой глубине должна быть достигнута температура полной аустенизации стали. Кроме того, избегали получения сквозной прокаливаемости детали. На рабочих лопатках после закали 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 закали с 1050 °С, отпуск 680 °С.

Для снятия напряжений лопатки упрочненные ТВЧ отпускались при 330 °С. Охлаждение после отпуска проводилось на воздухе.

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

Исследование проводилось на 5 образцах, вырезанных в различных сечениях лопатки в поперечном направлении.

Вид поперечных образцов для исследований микроструктуры и микротвердости приведен на рис. 1.

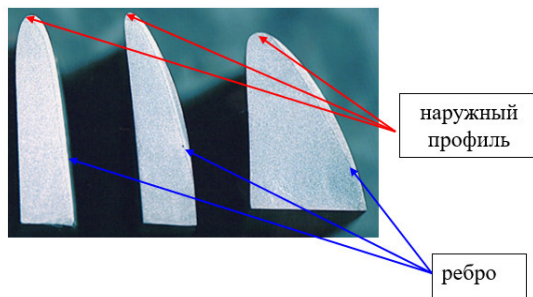


Рис. 1. Вид поперечных образцов для исследования

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

Таблица 2 Глубина закаленного слоя исследованных образцов

№ образца	Глубина слоя, мм	
	наружный профиль	ребро
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

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

Согласно данным, приведенным в таблице, глубина закаленного слоя образцов значительно отличается между собой, что обусловлено сложной конфигурацией профиля лопатки и, как результат, различным зазором между телом лопатки и индуктором, в ре-

зультате чего тепловложение по сечению лопатки также не стабильно. На участке наружного профиля образца № 5 слой отсутствует. Данный образец вырезан из лопатки вблизи бандажного отверстия.

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

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

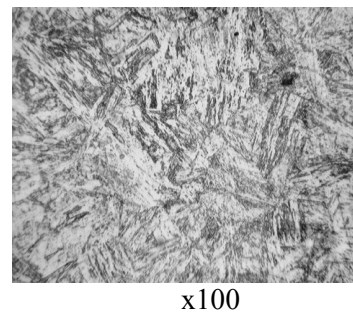


Рис. 2. Микроструктура металла лопатки после объемной термической обработки

Микроструктура слоя, закаленного ТВЧ, приведена на рис. 3. После поверхностной закалки ТВЧ с оптимальных температур микроструктура закаленного слоя состоит из бесструктурного или безиглольчатого мартенсита, что обеспечивает существенное повышение прочности, пластичности и вязкости слоя.

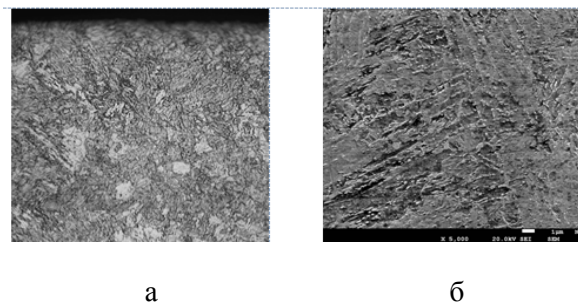


Рис. 3. Микроструктура упрочненного слоя: а – при увеличении  $\times 100$ ; б – при увеличении  $\times 5000$

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 степени низкого

давления, и проводились на приборе ПМТ-3 при нагрузке 50 г.

Распределения микротвердости по глубине закаленного слоя представлены в виде графиков на рис. 4, 5.

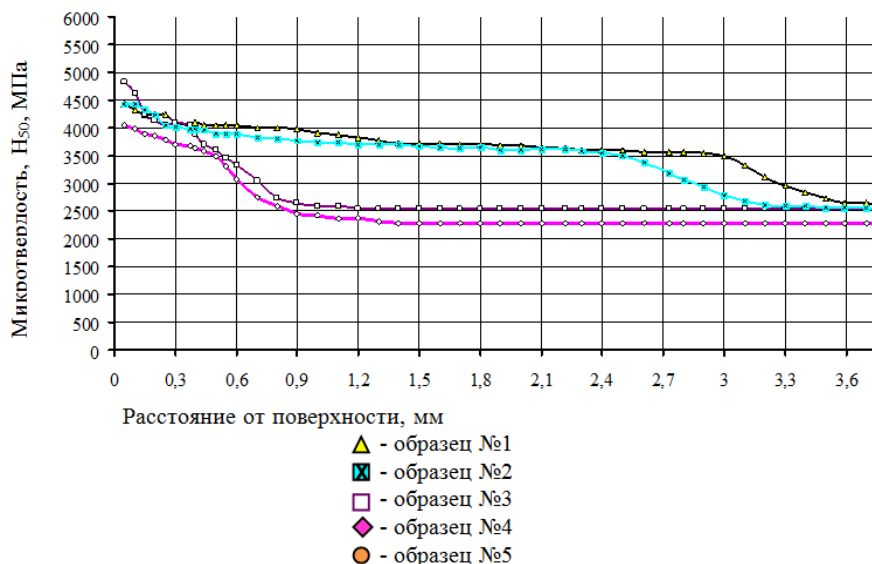


Рис. 4. Распределение микротвердости от поверхности до сердцевины по наружному профилю лопатки

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 со слоями, имеющими минимальную глубину слоя 0,6 мм. В поверхностной зоне образцов микротвердость имеет максимальное значение на уровне 5600 МПа.

При упрочнении токами высокой частоты принципиально получить на поверхности лопатки сжимающие напряжения, т.к. растягивающие остаточные напряжения отрицательно влияют на усталостную прочность.

Нагреваясь, поверхностный слой лопатки расширяется в сторону свободной поверхности, испытывает 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 степени низкого давления паровой турбины. Результаты замеров, выполненные методом рентгеновской

тензометрии, приведены на рис. 6. Как видно из рис. 6, непосредственно в самом закаленном слое по всей его глубине действуют сжимающие остаточные напряжения (до  $55 \text{ кг/мм}^2$ ). На рубеже закаленного слоя с незакаленным металлом остаточные сжимающие напряжения перерастают в растягивающие (до  $14\text{--}20 \text{ кг/мм}^2$ ), которые, однако, не носят пикового характера, а равномерно распространяются вглубь лопатки.

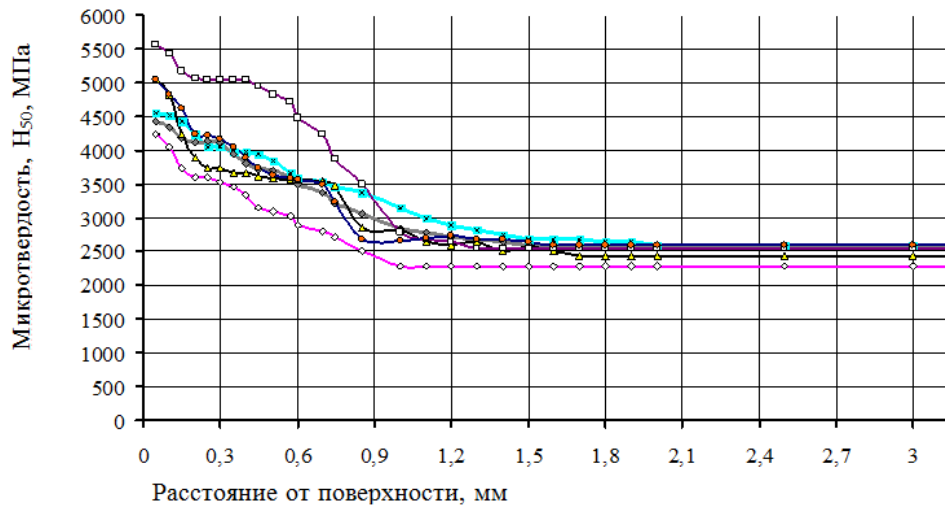


Рис. 5. Распределение микротвердости от поверхности до сердцевины по ребру лопатки

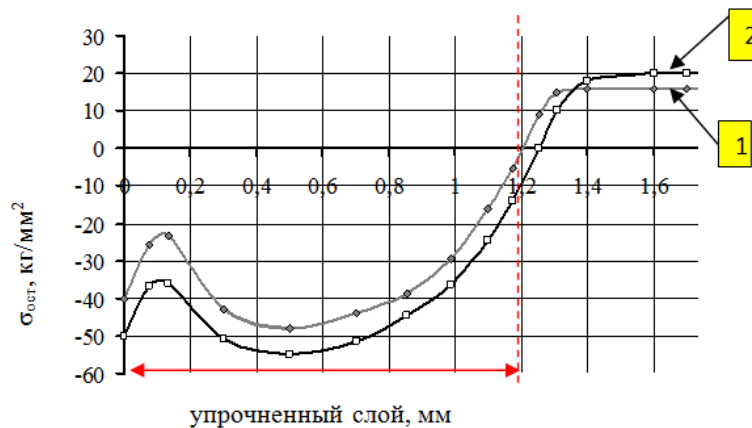


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений по глубине лопатки после закалки ТВЧ: 1 – на расстоянии 4 мм от крайней точки наружного профиля; 2 – на расстоянии 8 мм от крайней точки наружного профиля

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

Исследована микроструктура и микротвердость после поверхностной закалки с нагре-

вом ТВЧ и последующего отпуска. Выбранный режим поверхностной закалки с нагревом ТВЧ обеспечил глубину закаленного слоя  $0,6\text{--}3,0 \text{ мм}$ .

Распределение микротвердости от поверхности до сердцевины образцов носит плавный характер. На поверхности закаленного слоя наблюдаются максимальные значения микро-

твердости, по мере удаления ее вглубь металла снижаются до значений микротвердости сердцевины.

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

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

### Литература

1. Субботин В.Г. Повышение эффективности турбинных установок тепловых электростанций. / В.Г. Субботин, Е.В. Левченко // Теплоэнергетика. – 2009. – № 9. – С. 50–54.
2. Смыслова М.К. Исследование и разработка комбинированных ионно-плазменных технологий, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств лопаток газовых и паровых турбин / М.К. Смыслова // Вестник УГАТУ. – 2004. – Т.5, №3(11). – С. 76–83.
3. Беляков А.В. Практика формирования электроискровых покрытий для упрочнения и восстановления лопаточного аппарата проточной части паровых турбин тепловых и атомных электростанций / А.В. Беляков, В.И. Шапин, А.Н. Горбачев // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 4.
4. Швецов В.Л. Комбинированная противозерозионная защита рабочих лопаток последних ступеней мощных паровых турбин / В.Л. Швецов // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – № 13 (1056).
5. Фадеев И.П. Эрозия влажнопаровых турбин / И.П. Фадеев. – Л.: Машиностроение, 1974. – 208 с.
6. Головин Г.Ф. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева / Г.Ф. Головин, Н.Ф. Зимин. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение: Ленингр. отделение, 1990. – 87 с.
7. Лахтин Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

Рецензент: В.И. Мощенок, профессор, к.т.н., ХНАДУ.

---