УДК 622.691

И.Н. Царева, О.Б. Бердник

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЛОПАТОК ТУРБИН ИЗ СТАЛИ ЭИ802 ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Институт проблем машиностроения РАН

В статье представлены результаты комплексного исследования состояния стали ЭИ802 после эксплуатации в реальных условиях на примере рабочих лопаток энергетической установки ГТ-35-770-2. Проанализированы изменения структуры и механических характеристик стали в процессе длительной (~30 000 час) работы при повышенных температурах, а также рассмотрены различные режимы восстановительной термической обработки для регенерации структуры и продления срока службы изделия.

Ключевые слова: лопатки турбин, сталь, термическая обработка, микроструктура, карбидная фаза, механические свойства.

Одним из основных узлов газотурбинных установок является газовая турбина, а наиболее ответственными деталями, к которым предъявляются самые высокие требования в производстве и при эксплуатации − рабочие и направляющие лопатки турбины. Лопатки турбины работают в достаточно жестких условиях, сочетающих высокие нагрузки и температуры, не характерные для остальных компонентов турбины. Под действием центробежных сил в поверхностном слое перовой части лопатки создаются переменные растягивающие напряжения и возникают значительные вибрации, следовательно, материал лопатки должен сопротивляться высоким усталостным напряжениям и вибрационным нагрузкам, а также иметь высокое сопротивление коррозии и эрозии.

В настоящее время в энергетике активно предпринимаются попытки повышения мощности газотурбинных установок (ГТУ), что достигается повышением рабочих температур. В стандартном режиме лопатки никогда не работают, а эксплуатируются на верхнем пределе рабочего интервала температур сплава. Температурный запас, обеспечивающий структурную стабильность сплава в случае неконтролируемого повышения температуры, должен составлять 50-100 °С.

В условиях значительного парка эксплуатируемых ГТУ наиболее экономичным вариантом поддержания энергоустановок в рабочем состоянии является проведение регламентных ремонтных мероприятий. Основная цель таких работ сводится к тому, чтобы при сравнительно невысоких затратах обеспечить гарантированный ресурс как отдельных деталей (например, лопаток турбины), так и изделия в целом. До настоящего времени в России преобладал простой, но дорогой подход при капитальном ремонте проточной части газовых турбин: исчерпавшие ресурс лопатки снимались с ротора турбины и заменялись закупленными новыми комплектами. Между тем, в 80 % случаев современные технологии позволяют проводить ремонт лопаток и назначать им новый, равный первоначальному, ресурс. При этом стоимость восстановленных лопаток на 35-50 % ниже стоимости новых [1,2].

Объект и методика исследования

В качестве объекта исследования была выбрана рабочая лопатка 4-ой ступени ротора турбины ГТ-35-770-2. Лопатки работают при повышенных температурах, изготовлены из стали марки 15Х12ВНМФ (15Х11МФ) (ЭИ802), это жаропрочная высоколегированная сталь мартенситно-ферритного класса. Эта сталь используется также для изготовления турбинных дисков и деталей турбин длительного срока службы при температурах до 780 °С.

Образцы для исследования микроструктуры, измерений твердости и определения механических характеристик были вырезаны из перовой части лопаток, так как материал в этой зоне наиболее подвержен эрозионному воздействию высокотемпературного потока.

Металлографические исследования микроструктуры выполняли на шлифах после травления их реактивом Марбле. Работы проводились на оптическом микроскопе «Axio Observer» и электронном микроскопе «VEGA TESCAN II».

Измерения микротвердости проводили на шлифах на микротвердомере ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76 при нагрузке на индентор 2 Н (ошибка измерения не превышала 2 %). Из экспериментальных значений микротвердости определяли локальный коэффициент пластичности по формуле [3]:

$$\delta_н = 1\text{-}14{,}3\cdot(1\text{-}\nu\text{-}2\nu^2)\cdot(H/E),$$

где H – среднее значение микротвердости, ν – коэффициент Пуассона, E – модуль упругости (E= 216 ГПа – для стали ЭИ802 [4]).

Механические испытания проводили на плоских образцах в соответствии по ГОСТ 1497-87 на разрывной машине У10Т.

Результаты исследования

В процессе длительной эксплуатации под воздействием высокотемпературного газового потока на поверхности лопаток образуются дефекты эрозионного и механического происхождения.

Металлографические исследования показали, что структура материала перовой части с большой наработкой состоит из среднеигольчатого мартенсита (~ балл 5) (рис. 1). В структуре замковой части обнаружен мелкоигольчатый мартенсит (~ балл 4). Микротвердость сплава после эксплуатации составляет 2,77 ГПа (264 HB).

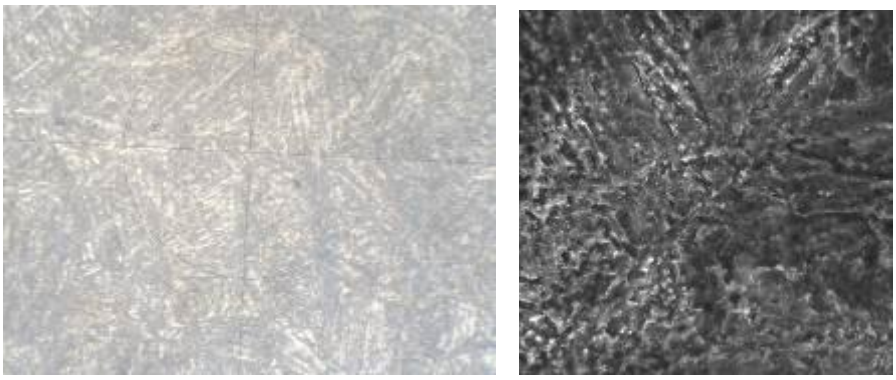
Для данной стали в литературе рекомендован следующий режим термической обработки: закалка с 1050 °С в масло, отпуск при 700-720 °С [5]. Механические свойства стали после рекомендуемой ТО приведены в табл. 1.

Для восстановления микроструктуры и механических свойств рабочих лопаток были опробованы следующие режимы термической обработки: закалка с Т = 1000 °С – 1,5 часа.

1. Старение Т = 700 °С – 5 часов, охлаждение на воздухе.
2. Старение Т = 740 °С – 5 часов, охлаждение на воздухе.
3. Старение Т = 600 °С – 5 часов, охлаждение на воздухе.
4. Старение Т = 700 °С – 5 часов, охлаждение на воздухе.
5. Старение Т = 700 °С – 5 часов, охлаждение на воздухе + Т = 700 °С – 5 часов, охлаждение с печью.
6. Старение Т = 740 °С – 5 часов, охлаждение на воздухе + старение Т = 700 °С – 5 часов, охлаждение с печью.
7. Старение Т = 600 °С – 5 часов, охлаждение на воздухе + старение Т = 700 °С – 5 часов, охлаждение с печью.
8. Старение Т = 700 °С – 5 часов, охлаждение на воздухе + отпуск Т = 700 °С – 5 часов, охлаждение с печью.

После проведения термических обработок (ТО) образцов из сплава ЭИ802 по предлагаемым режимам в микроструктуре материала произошли изменения, которые представлены на рис. 2-5.

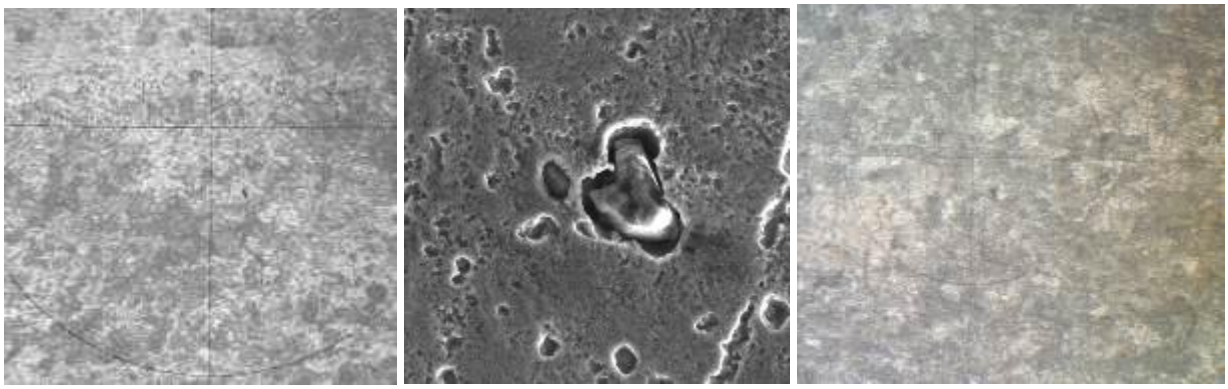
После термообработки по *режиму 1* в структуре получили мелкоигольчатый мартенсит (~3 балл). Выявлены многочисленные выделения карбидов (предположительно карбидов хрома) размером от 2 до 3 мкм, величина отдельных крупных карбидов достигает ~ 10 мкм (рис. 2 *б*), наблюдается тонкая сетка карбидной фазы. Микротвердость материала составляет 2,6 ГПа (250 HB).



***а*, x500** ***б*, x10 000**

Рис. 1. Микроструктура стали ЭИ802 перовой части рабочей лопатки после эксплуатации

После дополнительного отпуска при Т = 700 °С, выдержка 5 часов, охлаждение с печью (*режим 5*) в структуре сохранился мелкоигольчатый (сорбитообразный) мартенсит отпуска (рис. 2 *в*). Микротвердость материала – 2,0 ГПа (190 НВ).

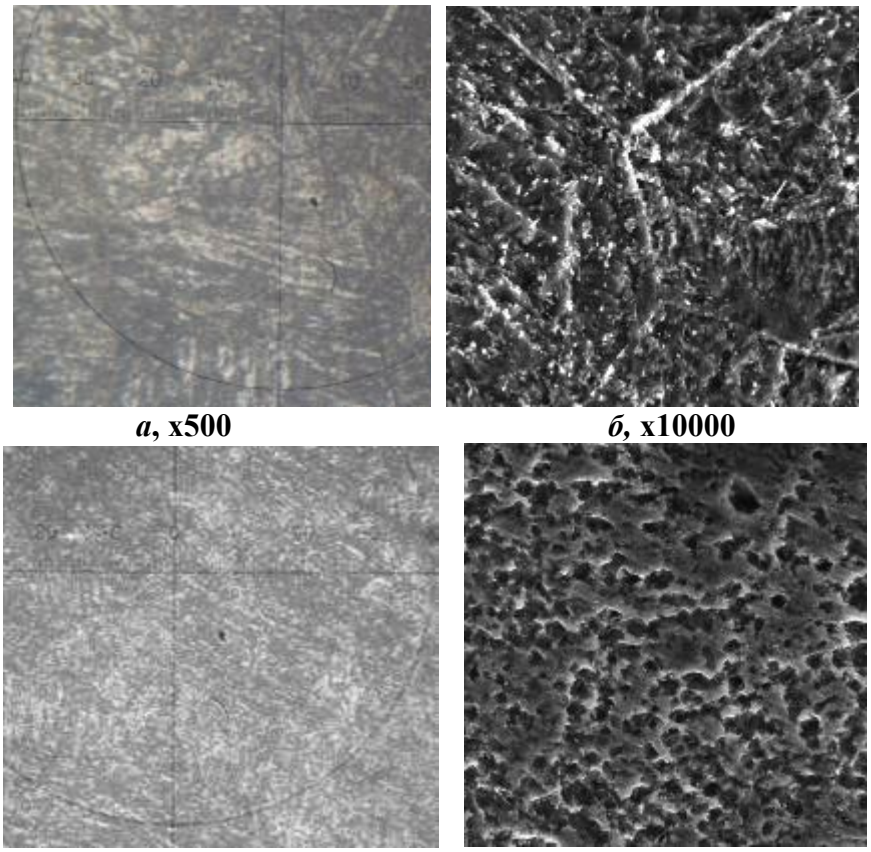


***а*, x500** ***б*, x5000** ***в*, x500**

Рис. 2. Микроструктура стали ЭИ802 после ТО (*режим 1*) (а, б); (*режим 5*) (в)

Термообработка по *режиму 2* привела к появлению в микроструктуре крупноигольчатого мартенсита (~ 7-8 балл) (рис. 3 *а*) с включениями карбидов (размером ~ 0,5-1,0 мкм), равномерно распределенных по телу шлифа (рис. 3 *б*). Микротвердость материала составляет 2,4 ГПа (230 НВ). ТО по *режиму 6* привела к измельчению мартенсита до 6 балла (среднеигольчатый мартенсит длиной 10 мкм) (рис. 3 *в, г*). Микротвердость материала после отпуска не изменилась – 2,4 ГПа (230 НВ).

После ТО по *режиму 3* получили в структуре мелкоигольчатый мартенсит или сорбит отпуска с сохраненной в нем ориентировкой мартенсита (длина игл 2,0-4,0 мкм) ~ балл 3-2 (рис. 4 *а*). Электронная микроскопия подтвердила наличие равномерно распределенной упрочняющей фазы. Микротвердость материала составляет 3,2 ГПа (300 НВ). Применение дополнительного отпуска (*режим 7)* привело к росту игл мартенсита (~ 8 мкм) (рис. 4). Микротвердость материала – 2,85 ГПа (270 НВ).

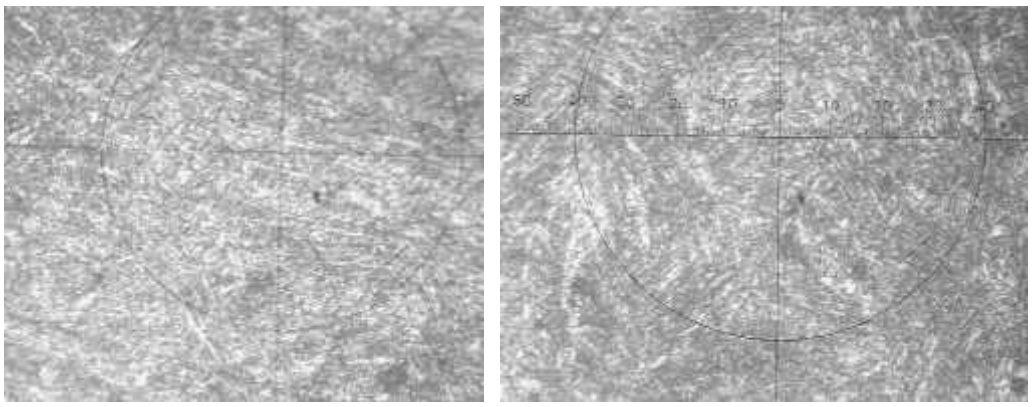


***а*, x500** ***б*, x10000**

***в*, x500** ***г*, x 10000**

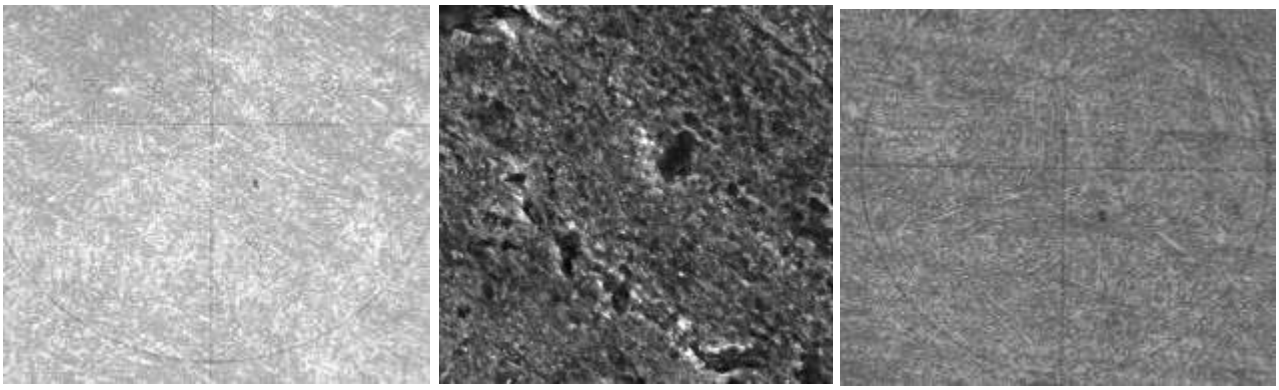
Рис. 3. Микроструктура стали ЭИ802 после ТО: по режиму 2 (*а,б*); по режиму 3 (*в,г*)

Термообработка по *режиму 4* привела к получению в структуре стали среднеигольчатого мартенсита (балл 6-7) (рис. 5 *а,б*). Микротвердость материала составляет 3,0 ГПа (285 НВ). Отпуск при 700 °С – 5 часов, охлаждение с печью (*режим 8*) привел к получению в структуре мартенсита отпуска и к снижению микротвердости до 2,7 ГПа (260 НВ) (рис. 5).



а ***б***

Рис. 4. Микроструктура стали ЭИ802 после ТО: по режиму 3 (*а*); по режиму 7 (*б*), x500



***а*, x500** ***б*, x10000** ***в*, x500**

Рис. 5. Микроструктура стали ЭИ802 после ТО: по *режиму 4* (*а,б*); *по режиму 8* (*в*)

Исходя из полученных данных (микроструктуры и твердости), оптимальным является режим: старение Т = 740 °С – 5 часов, охлаждение на воздухе + отпуск Т = 700 °С – 5 часов, охлаждение с печью, так как при использовании данной ТО получаем стабильную микроструктуру среднеигольчатого мартенсита. Микротвердость материала после старения (Т = 740 °С – 5 часов, охлаждение на воздухе) составляет 2,4 ГПа (230 НВ) и сохраняется на этом уровне (2,4 ГПа (230 НВ)) после второго отпуска.

Используя экспериментальные значения микротвердости, были проведены теоретические оценки коэффициента пластичности ($\delta_н$) [6], характеризующего способность материала воспринимать упругие и пластические деформации. Для обеспечения достаточного уровня пластичности длительно работающего металлического материала коэффициент пластичности должен быть не менее $\delta_Н = 0{,}8$ (рис. 6). Для измеренных значений твердости в интервале от $Н_{200}^{(min)} = 2{,}0$ ГПа до $Н_{200}^{(max)} = 3{,}2$ ГПа коэффициент пластичности находится в допустимых пределах: от $\delta_Н = 0{,}89$ до $\delta_Н = 0{,}82$. Среднее значение твердости тем более будет удовлетворять данному критерию оценки пластичности материала.

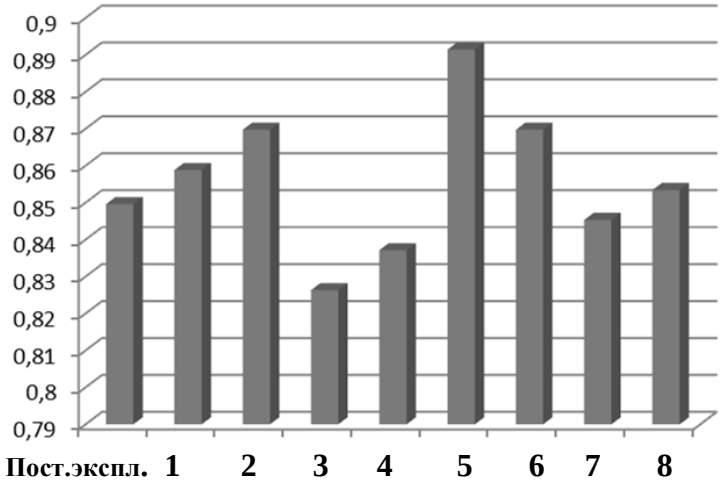


Рис. 6. Значения коэффициента пластичности для разного состояния стали

В табл. 1 приведены результаты испытаний механических свойств образцов, изготовленных из материала лопатки после эксплуатации и образцов, прошедших термическую обработку. После эксплуатации из-за деградации материала наблюдается повышение предела прочности в 1,33 раза (с 740 МПа до 940-1030 МПа) и понижение предела текучести 2,1 раза (с 590 МПа до 280 МПа). С помощью ТО удалось восстановить значения механических характеристик практически до нормируемых значений. Произошло понижение предела проч-

ности на 170 МПа и ($\sigma_в$ = 770 МПа), повышение предела текучести на 180 МПа (σ_{02} = 460 МПа), что, однако, ниже нормы в 1,28 раз.

Таблица 1.

Результаты испытаний механических свойств стали ЭИ802

Состояние образца	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Предел текучести, σ_{02}, МПа	Относ. удлинение δ, %	Относ. сужение ψ, %
ГОСТ 5632-72	≥ 740	≥ 590	≥ 15	≥ 45
После эксплуатации	940	280	11	44
ТО (Закалка с 1050 °С в масло, отпуск при 700-720 °С) [1]	690	510	18	57
ТО по *режиму 2*	770	455	15	49
ТО по *режиму 5*	755	460	15	53

Выводы

Рабочие лопатки турбины, изготовленные из стали ЭИ802, после эксплуатации имеют деградированное структурно-фазовое состояние и неудовлетворительные показатели механических характеристик. Применение восстановительной термической обработки приводит к регенерации микроструктуры и показателей механических свойств до нормируемых значений ($\sigma_в$ = 755 МПа; $\sigma_{o,2}$.= 460 МПа; δ = 15 %; ψ = 53 %).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2013-2020 гг. по теме № 0035-2014-0401 (№ госрегистрации 01201458049).

Библиографический список

1. Тарасенко, Ю.П. Структурно-фазовое состояние и механические свойства материала лопатки турбины высокого давления после разрушения [Текст] / Ю.П Тарасенко., И.Н. Царева, О.Б. Бердник // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2011. № 3. С. 27-34.
2. Тарасенко, Ю.П. Оптимизация режима термической обработки для продления ресурса лопаток турбин высокого давления [Текст] / Ю.П. Тарасенко, И.Н. Царева, О.Б. Бердник // Материаловедение. 2012. № 5. С.24-29.
3. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. [Текст] / А.С Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. Под общ. ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
4. ГОСТ 8233-56. Сталь. Эталоны микроструктуры [Текст]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 12 с.
5. Масленков, С.Б. Жаропрочные стали и сплавы. Справочное издание [Текст] / С.Б. Масленков. – М.: Металлургия, 1983. – 192 с.
6. Мильман, Ю.В. Характеристики пластичности, получаемые при измерении твердости [Текст] / Ю.В. Мильман, Б.А. Галанов, С.И. Чугунова. – Киев: Институт проблем материаловедения им. И.М. Францевича АН Украины, 1992. – 23 с.