



ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

Я. ДЗЯНХУА, В. ЛИАНГ, Ч. КАНЛИ, Ч. ЧЖИДЗУНГ (Технологический ун-т Жеианга, г. Ханчжоу, Китай),
В. С. КОВАЛЕНКО (Ин-т исследований по лазерной технологии НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Характерным видом механического разрушения участка входной кромки лопаток паровых турбин под воздействием капель воды считается эрозия. Рассмотрены три вида лазерной обработки: лазерная закалка, лазерный переплав и лазерная наплавка для предупреждения эрозии на лопатках из нержавеющей стали 20X13. Сравнены остаточные напряжения и механические свойства лопаток при использовании трех методов обработки. Показано, что поверхностная микротвердость лопаток повышается после лазерной обработки поверхности. При этом повышается прочность материала, однако снижаются удлинение и сужение. Ударные разрушения носят характер хрупких разрушений. Зона лазерного упрочнения содержит остаточные сжимающие напряжения, а зона термического влияния — небольшие поперечные растягивающие напряжения.

Ключевые слова: лазерная обработка, лопатки турбин, хромистая сталь, остаточные напряжения, механические свойства

Лопатки паровых турбин являются ответственными компонентами силовых установок, которые преобразуют линейное движение пара высокой температуры и высокого давления, движущегося в сторону снижения давления, во вращательное движение вала турбины [1, 2]. Эрозия под воздействием капель воды является хорошо известным явлением на движущихся лопатках, работающих на стороне паровых турбин с низким давлением. Она инициируется конденсатом «маленьких» первичных капель в объеме переохлажденного пара в потоке, который затем разделяется на поверхности лопатки и приводит к образованию «крупных» капель, вызывающих эрозию [3].

Для улучшения сопротивления эрозии лопаток с низким давлением под воздействием капель воды применяли лазерную наплавку сплавом стеллита, которая приводила к образованию остаточных напряжений на участке наплавки [4]. Причиной их образования является различие в тепловом расширении между сплавом стеллита и основным металлом при охлаждении, тепловой деформации, вызванной различиями в нагреве/охлаждении на разных участках и направленной жесткостью в пределах имеющихся сечений [5].

Для упрочнения лопаток паровых турбин, а также поддержания высокой твердости поверхности, преодоления высоких остаточных напряжений после лазерной наплавки и получения плотного упрочненного слоя с хорошей адгезией использовали лазерную закалку, лазерный переплав и лазерное сплавление [6, 7]. Как один из

вариантов закаливаемых сталей хромистая сталь 20X13 сочетает отличную износостойкость высокоуглеродистых сталей с высокой коррозионной стойкостью хромистой нержавеющей стали. При введении достаточного количества углерода в хромистую нержавеющую сталь последняя приобретает высокие прочность, твердость, при этом обеспечивается необходимая коррозионная стойкость и повышается износостойкость данной стали. Благодаря упомянутым достоинствам сталь 20X13 применяют для изготовления стоматологических, хирургических инструментов, а также лопаток паровых турбин.

В данной работе способы лазерной закалки, лазерного переплава и лазерной наплавки применяли на лопатках паровых турбин из стали 20X13 с целью обеспечения высокой твердости поверхности и низких остаточных напряжений. При лазерной закалке осуществление процесса предусматривает лазерный нагрев и естественное охлаждение. Лазерный переплав является процессом быстрого оплавления и кристаллизации поверхности материала. Благодаря добавлению легирующего материала на поверхность подложки способ лазерной наплавки может обеспечить высокое качество поверхности при сохранении исходных свойств материала в объеме. Эти три способа перспективны применительно к лопаткам различного типа, эксплуатирующихся в различных рабочих средах, в качестве альтернативы традиционным методам упрочнения лопаток. В этом случае срок службы лопаток увеличится при сохранении высокой эффективности работы агрегатов. В настоящей работе исследованы микроструктура, микротвердость, механические свойства



и остаточные напряжения в поверхностном слое лопаток, упрочненном различными способами.

Методика проведения экспериментов. В качестве материала подложки использовали сталь 20X13, которую подвергали закалке и отпуску (нагрев до 980...1035 °С, за которым следовала закалка в масле, а затем отпуск при 220...300 °С). Химический состав нержавеющей стали 20X13 следующий, мас. %: 0,16...0,21 С; 12 Сг; <1 Si; <0,8 Mn; <0,03 Si; <0,04 P; остальное — Fe. На рис. 1, а приведена микроструктура нержавеющей стали 20X13, демонстрирующая структуру сорбита отпуска. Поверхность очищали путем обработки ультразвуком в ацетоне или спирте. После этого при лазерной наплавке на нее наносили легирующий порошок, смешанный с некоторым количеством связки. Эти эксперименты проводили с помощью CO₂-лазерной установки с номинальной мощностью лазера 7 кВт и рабочим столом с ЧПУ. Для упрочнения лопаток паровых турбин из стали 20X13 использовали три различных оптимизированных параметра лазерной обработки (табл. 1). Образцы № 1–3 обрабатывали соответственно путем лазерной закалки, переплава и сплавления. Химический состав материала для лазерного поверхностного сплавления для трех образцов следующий, мас. %: 1,3 Si; 2,86 Сг; 3,29 Ni; 0,98 Fe; 40,24 W; 51,33 Со.

Механические свойства определяли с помощью гидравлической универсальной испытатель-

Т а б л и ц а 1. Оптимизированные параметры лазера (сечение луча лазера 2×8 мм²)

Номер образца	Мощность, кВт	Скорость сканирования, мм/мин	Добавленный легирующий порошок
1	1,2	300	Нет
2	1,6	500	»
3	1,6	500	Есть

ной машины WE-30. Микроструктуру и химический состав изучали с использованием сканирующего электронного микроскопа FEI-SIRION100, оснащенного энергодифракционным спектрометром Thermo NORAN (ЭДС). Картины фазового распределения на поверхности измеряли на Thermo SCINTAG TRA. Микротвердость оценивали с помощью прибора HDX100 с нагрузкой 200 г и временем действия 15 с. Остаточные напряжения определяли с помощью измерителя остаточных напряжений X-350А.

Результаты и их обсуждение. *Микроструктура и микротвердость.* После лазерной закалки образца № 1 в слое лазерного упрочнения был обнаружен мелкий мартенсит, расположенный в шахматном порядке (рис. 1, б). В процессе быстрого нагрева и охлаждения при лазерном упрочнении рост зерен аустенита сдерживается и образуется высокодисперсная микроструктура, что приводит к повышению твердости поверхности. После лазерного переплава у образца № 2 по-

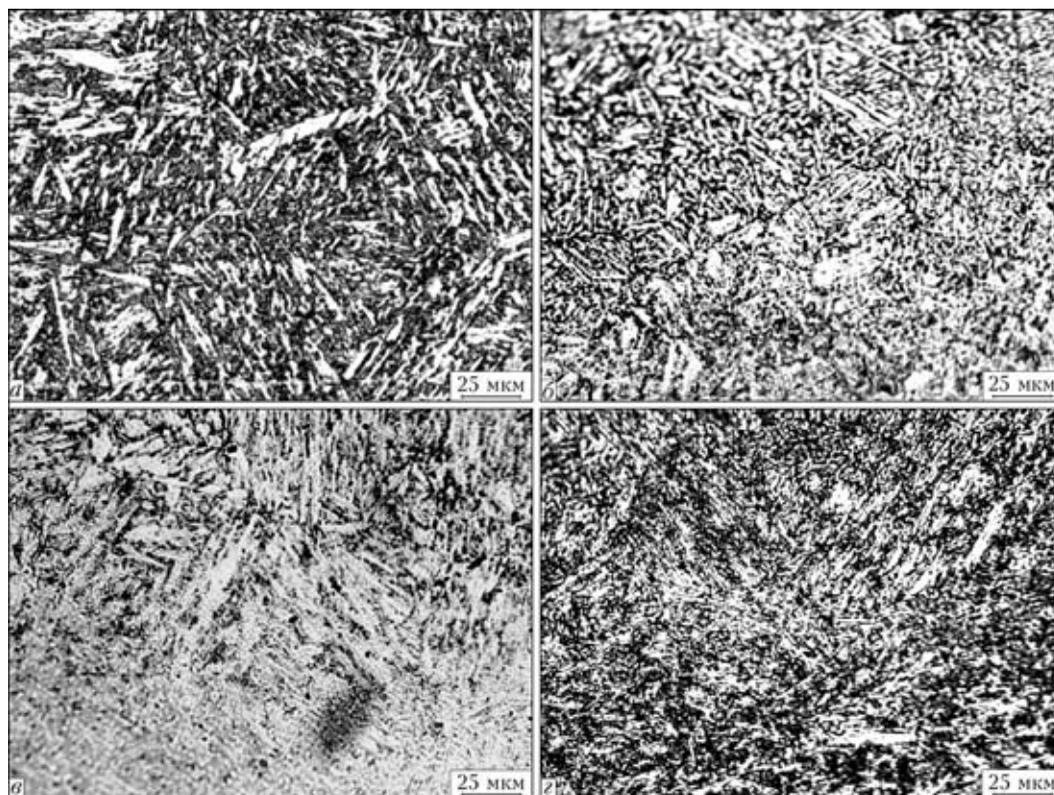


Рис. 1. Микроструктура подложки (а) и средней части слоя лазерного упрочнения: а — подложка (сталь 20X13); б — лазерная закалка (образец № 1); в — лазерный переплав (образец № 2); г — лазерная наплавка (образец № 3)



верхность переплавленного слоя, видимо, имеет литую структуру, а мартенсит в металле ЗТВ крупнее, чем в подложке (рис. 1, в). По сравнению с лазерным переплавом микроструктура после лазерной наплавки намного мельче (рис. 1, з). В процессе лазерной наплавки под влиянием лазерного излучения большой мощности поверхность образца расплавляется, а легирующий порошок сплавляется с расплавленным слоем, что подтверждают результаты ЭДС. Химический состав слоя, полученного лазерным сплавлением, следующий, мас. %: 0,29 Si; 13,78 Cr; 10,59 W; 0,47 Ni; 0,46 V; 1,32 Mo; Fe, остальное — С. Согласно результатам фазового распределения, приведенным на рис. 2, фазы легированного слоя включают WC, Fe₂C и Cr₇C₃ (рис. 2). Сильно децетрированные твердые фазы WC будут основной причиной улучшения микроструктуры. Закаливаемость материалов усиливается благодаря присутствию хрома. В то же время твердость повышается благодаря образованию твердых фаз Cr₇C₃. Поскольку никель является элементом, обеспечивающим расширение области аустенита, то его добавка предотвращает образование частиц второй фазы и улучшает характеристики сопротивления эрозии поверхности.

Твердость поперечного сечения после лазерного упрочнения испытывали в направлении от поверхности к подложке (рис. 3). Как видно из рисунка, толщина слоя лазерной закалки у образца № 1 равна около 1,2 мм, толщина слоя лазерного переплава у образца № 2 около 0,9 мм, а лазерной наплавки у образца № 3 — около 0,4 мм. Твердость снижается от поверхности к подложке с определенным градиентом. Твердость закаленного слоя образца № 1 ниже, чем у образцов № 2 и 3. Однако глубина закаленного слоя больше, чем у образцов № 2 и 3. Более низкая скорость приводит к большей глубине нагреваемого слоя и преобразованию в более мелкий мартенсит с шахматным расположением, что является основ-

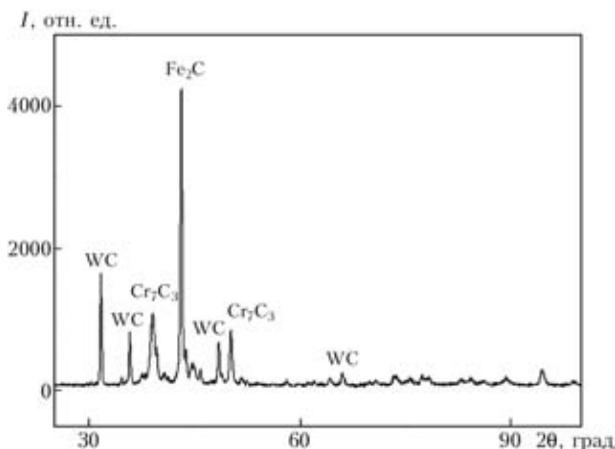


Рис. 2. Картина фазового распределения верхней части поверхности слоя, полученного лазерным сплавлением

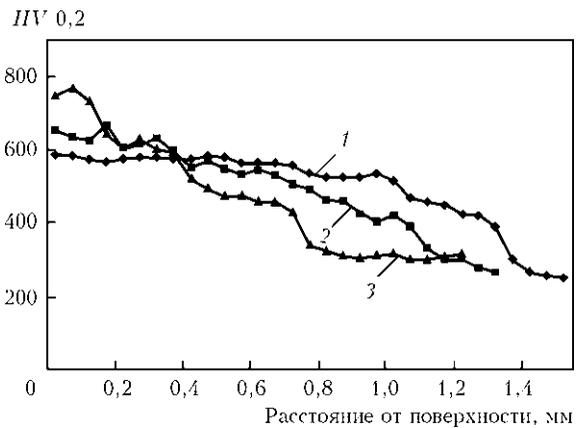


Рис. 3. Твердость поперечного сечения образцов № 1–3 (1–3) после лазерной обработки

ным механизмом упрочнения при лазерной закалке (рис. 2). Из-за более высокой скорости лазерного сканирования и высокой скорости охлаждения упрочненный слой образцов № 2 и 3 тоньше, чем образца № 1. Наибольшее значение твердости обнаружено в образце № 3 из-за добавленного легирующего материала и твердых фаз (WC, Fe₂C и Cr₇C₃) после лазерной обработки.

Механические свойства. Результаты испытаний образцов на растяжение после лазерной обработки приведены в табл. 2. После лазерной обработки прочность образцов на растяжение улучшается, а удлинение и сужение поперечного сечения уменьшаются. После лазерной закалки у образца № 1 зерна измельчаются, так что прочность на растяжение немного увеличивается. По сравнению с технологией лазерной закалки лазерный переплав и лазерная наплавка требуют более высокой плотности мощности лазера для расплавления поверхности. Из-за литой микроструктуры пластические свойства несколько ухудшаются.

Результаты испытания на удар после лазерной обработки приведены в табл. 3. Из-за остаточных напряжений и хрупкого мартенсита после лазерного облучения ударная вязкость всех образцов снижается.

На рис. 4 показаны фрактограммы изломов подложки и трех образцов после ударного разрушения. В подложке обнаруживается большое количество плоскостей скола, но есть и частичные

Таблица 2. Результаты испытания образцов на растяжение после лазерной обработки

Номер образца	Прочность на растяжение, МПа	Удлинение, %	Сужение, %
1	881,51	15,93	39,40
2	860,14	13,88	33,43
3	863,88	13,47	32,77
Подложка	850,65	15,97	41,50

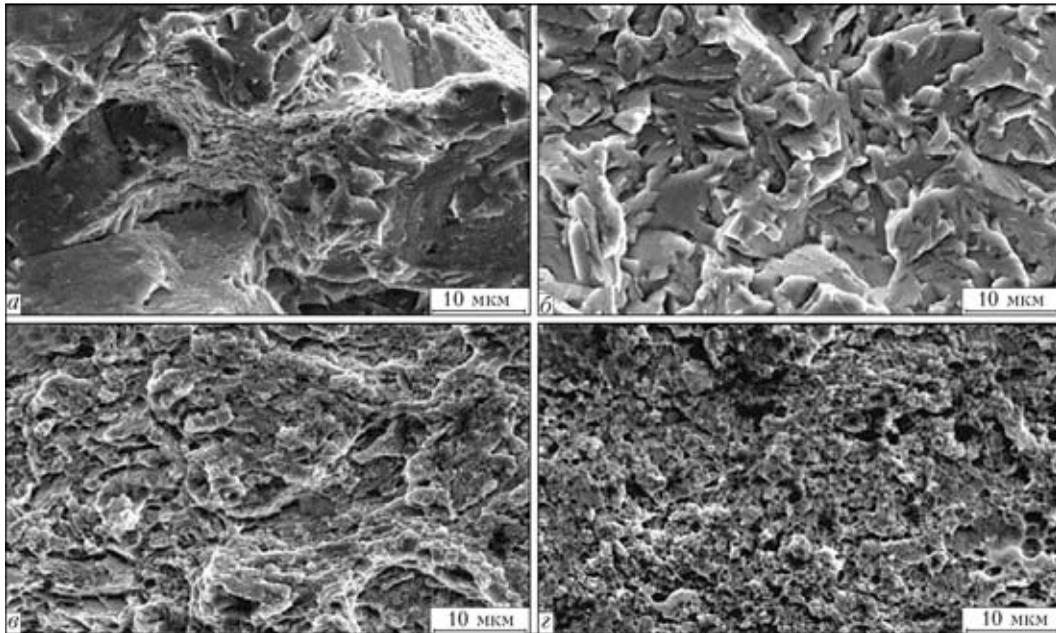


Рис. 4. Фрактограммы изломов упрочненных лазерной обработкой образцов после ударного разрушения: а — подложка; б — лазерная закалка (образец № 1); в — лазерный переплав (образец № 2); з — лазерная наплавка (образец № 3)

ямки. После лазерной закалки у образца № 1 зерна плоскости скола становятся немного меньше. После лазерного переплава и лазерной наплавки у образцов № 2 и 3 также наблюдаются плоскости скола. Из-за более высокой мощности лазера и более высокой скорости охлаждения зерна намного мельче, чем в образце № 1, так что плоскости скола меньше, чем у подложки и образца № 1.

Остаточные напряжения. Участок лазерного упрочнения (рис. 5) представляет собой выпуклую поверхность лопаток и подвергается воздействию капель воды на последней ступени паровых турбин. Во избежание интегральной деформации и снижения стоимости для упрочнения было выбрано только локальное сечение. Как видно из рис. 5, точки 1, 3–8 находятся на участке лазерной закалки, точки 2 и 9 — в металле ЗТВ, а точка 10 — в подложке для сравнения.

Распределение остаточных напряжений в лопатках после лазерной закалки и лазерной наплавки приведены на рис. 6. Параметры обработки при лазерном переплаве такие же, что и при лазерной наплавке, так что результаты испытаний на остаточные напряжения после лазерной наплавки рассматриваются приблизительно как такие же, что и при лазерном сплавлении. Поперечное и продольное напряжение на поверхности исходной лопатки (рис. 5, точка 10) равны соответственно 231 и 212 МПа. Поперечное остаточное напряжение в металле ЗТВ представляет собой растягивающее напряжение, а продольное остаточное сжимающее напряжение в металле ЗТВ намного ниже, чем на участке лазерной обработки (рис. 5, точки 2 и 9). Остаточное напряжение точек 2 и 3 аналогично точкам 8 и 9 на рис. 5. Все эти точки находятся возле исходного поло-

Таблица 3. Результаты испытаний на удар после лазерной обработки

Номер образца	Энергия удара, Дж	Вязкость, Дж/см ²
1	37,3	46,67
2	37,4	46,83
3	37,0	46,25
Подложка	37,7	47,08

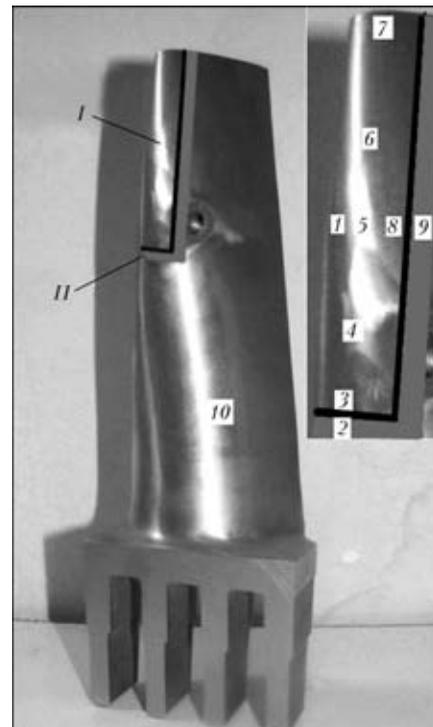


Рис. 5. Места распределения точек испытания (1–10) на остаточные напряжения на участке лазерной закалки: I — участок лазерного упрочнения; II — ЗТВ

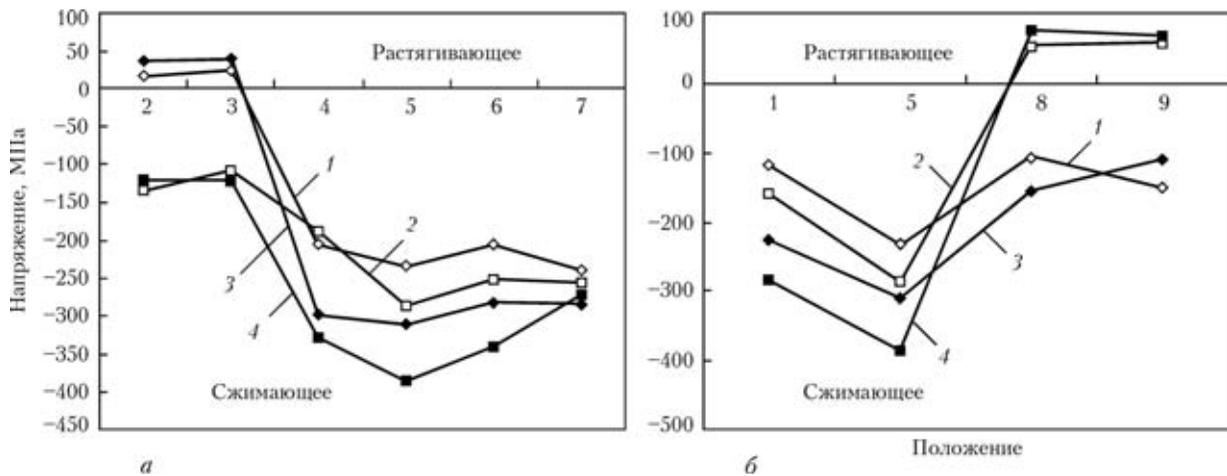


Рис. 6. Распределение остаточных (см. точки 2–7 на рис. 5) (а) и растягивающих (б) (1, 5, 8, 9) напряжений в лопатках: 1, 3 — соответственно поперечное направление; 2, 4 — продольное

жения лазерного сканирования с более низкой энергией лазера, так что эффект отжига со снятием напряжений при более низкой энергии лазерного излучения приводит к состоянию остаточных напряжений, отличающемуся от участка под воздействием высокой излучающей энергии лазера. Все остаточные напряжения на участке с высокой энергией лазерной обработки представляют собой сжимающие напряжения. Очевидно, что сжимающее остаточное напряжение после лазерного сплавления больше, чем при лазерной закалке как в поперечном, так и в продольном направлении. Под влиянием быстрого нагрева лазером и быстрого охлаждения в материале происходят фазовые изменения с преобразованием аустенита в мартенсит при обработке лазерной закалкой, что приводит к расширению объема. Следовательно, на поверхности материала присутствуют сжимающие остаточные напряжения. Для лазерного сплавления необходима более высокая мощность лазера, чтобы обрабатываемый участок поверхности лопатки расплавлялся. При короткой обработке быстрым охлаждением после лазерного нагрева расплавленный материал сразу же кристаллизуется, а исходное напряженное состояние одновременно изменяется [8]. На практике соответствующее сжимающее напряжение является благоприятным, в то время как растягивающее напряжение может привести к снижению усталостной прочности лопаток.

В заключение следует отметить, что упрочненный слой самой большой толщины обнаружен после лазерной закалки, однако твердость его ниже, чем при лазерном переплаве и лазерной наплавке. Мартенсит, распределенный в шахматном порядке, является основной микроструктурой упрочненного слоя после лазерной закалки. Микроструктура после лазерного переплава мельче, чем при лазерной закалке. Лазерная наплавка обеспечивает наибольшую твердость ($HV_{0,2}$ — 780), но при этом обеспечивается тонкий упроч-

ненный слой. Основными упрочняющими фазами в легированном слое являются WC, Fe_2C и Cr_7C_3 .

После обработки тремя лазерными способами прочность материала на растяжение улучшается, и в то же время снижаются удлинение и сужение поперечного сечения. Ударная вязкость материала не снижается после лазерного упрочнения. Исходя из анализа ударного разрушения сканирующим электронным методом, ударные разрушения упрочненных слоев содержали большое количество хрупких разрушений. При повышении скорости лазерного сканирования и мощности лазера зерна плоскостей скола постепенно становятся меньше. Наименьшая плоскость скола установлена у образца, полученного при лазерном сплавлении.

После лазерной обработки в зоне лазерного упрочнения присутствуют высокие остаточные сжимающие напряжения в обоих направлениях. Но на кромке зоны лазерного сканирования и в металле ЗТВ присутствуют поперечные растягивающие напряжения и более низкие продольные сжимающие напряжения. По сравнению с поверхностным остаточным напряжением после лазерной закалки остаточное сжимающее напряжение после лазерного сплавления повышается на 35%.

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при выборе способа упрочнения поверхности лопаток паровых турбин.

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку работы, выполненной в рамках проекта международного сотрудничества Министерства науки и технологий (JG-JD-2008001) и Открытого регионального фонда по теме «Передовые обрабатывающие технологии (АМТ200506-009)».

1. Failure analysis of the final stage blade in steam turbine / W. Wei-Ze, X. Fu-Zhen, Z. Kui-Long, Shan-Tung Tu // Mater. Sci. Eng. A. — 2006. — 437. — P. 70–74.
2. Steam turbine blade failure analysis / Z. Mazur, R. Garcia-Illescas, J. Aguirre-Romano, N. Perez-Rodriguez // Eng. Fail. Anal. — 2008. — 15. — P. 129–141.



3. Mann B.S., Vivek Arya. HVOF coating and surface treatment for enhancing droplet erosion resistance of steam turbine blades // *Wear*. — 2003. — **254**. — P. 652–667.
4. Kathuria Y. P. Some aspects of laser surface cladding in the turbine industry // *Surf. Coat. Technol.* — 2000. — **132**. — P. 262–269.
5. Residual stress measurements in laser clad repaired low pressure turbine blades for the power industry / P. Bendeich, N. Alamb, M. Brandt et al. // *Mater. Sci. Eng. A*. — 2006. — **437**. — P. 70–74.
6. Coating residual stress effects on fatigue performance of 7050-T7451 aluminum alloy / A. A. Marin de Camargo, H. J. Cornelis, V. M. Odila Hilario Cioffi, Midori Yoshikawa Pitanga Costa // *Surf. Coat. Technol.* — 2007. — **201**. — P. 9448–9455.
7. Fatigue behaviour of laser repairing welded joints / L. P. Borrego, J. T. B. Pires, J. M. Costa, J. M. Ferreira // *Eng. Fail. Anal.* — 2007. — **14**. — P. 1586–1593.
8. Influence of an intermediate layer on the residual stress field in a laser clad / A. Frenka, C. F. Marsdena, J.-D. Wagnie'rea et al. // *Surf. Coat. Technol.* — 1991. — **45**. — P. 435–441.

Erosion is considered to be a characteristic type of mechanical fracture in a region of steam turbine blade edges, which may occur under the effect of water drops. Three types of laser treatment, including laser hardening, laser remelting and laser cladding, intended for prevention of erosion of the blades made from stainless steel 20Kh13 are examined. Residual stresses and mechanical properties resulting from the use of the three surface modification methods are compared. It is shown that laser surface modification causes increase in surface microhardness of the blades and strength of the material, but leads to decrease in elongation and reduction in area. Impact fractures are of a brittle character. Residual compressive stresses form in the laser-hardened zone, and low transverse tensile stresses form in the heat-affected zone.

Поступила в редакцию 06.07.2009

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ДЛЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭКОНОМИКА В МАШИНОСТРОЕНИИ»

20–21 мая 2010 г.

г. Юрга, ЮТИ ТПУ

Организаторы конференции

- Томский политехнический университет
- Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета
- Департамент образования и науки Кемеровской области
- Администрация города Юрги

Секции и научные направления конференции

1. Инновационные технологии получения неразъемных соединений в машиностроении

- инновационные технологии сварочного производства
- применение сварочной техники в отраслях промышленности
- контроль качества сварных конструкций и сертификация

2. Инновационные технологии получения и обработки материалов в машиностроении

- инновационные технологии получения и обработки материалов
- электрометаллургия стали и ферросплавов
- контроль качества и сертификация металлургической продукции
- оборудование механической и физико-технической обработки
- технологии быстрого прототипирования
- конструирование и совершенствование машин и механизмов

3. Автоматизация, информатизация, экономика и менеджмент на предприятии

- автоматизация производственных процессов и компьютерные технологии
- общие вопросы программного обеспечения
- информационные технологии в управлении
- экономика
- менеджмент, сертификация и маркетинг производственных процессов

4. Защита окружающей среды, безопасность и охрана труда на предприятиях

- отраслевые, региональные и международные аспекты экологии и БЖД
- решение проблемы отходов и ресурсосбережения
- современные методы защиты в чрезвычайных ситуациях

5. Передовые технологии и техника для разработки недр и землепользования

- новые техника и технологии освоения подземного пространства
- геология и геомеханика
- инновационные технологии и современные технические средства АПК

6. Научная школа для молодых ученых «Новые и новейшие технологии в машиностроении»

Организационный комитет

Адрес: ЮТИ ТПУ, 652055, Кемеровская область, г. Юрга, ул. Ленинградская, д. 26

Тел.: (+7 38451) 6-53-95

Факс: (+7 38451) 6-53-95

www.uti.tpu.ru, utiscience@rambler.ru

Председатель Оргкомитета: Чинахов Дмитрий Анатольевич, канд. техн. наук, доцент

Секретарь конференции: Фисоченко Елена Геннадьевна