

УДК 621.165.001.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-27-32

Использование роботизированного комплекса при восстановлении рабочих лопаток паровых турбин

Д.В. Настека, А.И. Лебедева

Использование перспективных инновационных методов восстановительного ремонта рабочих лопаток паровых турбин — актуальная задача отечественной энергетики. К их числу относится метод лазерно-порошковой наплавки.

Рабочие лопатки последних ступеней цилиндров низкого давления (ЦНД) паровых турбин эксплуатируются в условиях воздействия двухфазного потока пара, что вызывает эрозионный износ входных кромок рабочих лопаток. Увеличение мощности паровых турбин связано с увеличением длины рабочих лопаток последних ступеней ЦНД. Это приводит к повышению окружных скоростей на периферии лопаток и более интенсивному эрозионному износу. При этом ухудшается аэродинамика обтекания пара рабочей лопатки, снижается КПД ступени, становится возможным возникновение трещин в пере рабочей лопатки, вызывающих их разрушение. Из-за высокой стоимости новых рабочих лопаток последних ступеней ЦНД экономически целесообразно восстановление поврежденной входной кромки рабочей лопатки с помощью различных технологий: аргонодуговой, плазменной и газопорошковой наплавки основного материала, электронно-лучевого легирования поверхностного слоя входной кромки рабочей лопатки, нанесения ионно-плазменных покрытий на поверхность пера лопатки, а также припайки стеллитовых пластин.

Поскольку основными материалами, используемыми для рабочих лопаток, являются стали мартенситного класса марок 12X13, 20X13, 15X11МФ, ЭИ-961, существенным условием успешного проведения операции восстановления рабочей лопатки является минимизация теплового воздействия на основной материал для исключения возможного формирования зон подкалочных структур. Использование технологий лазерной наплавки полностью отвечает этому условию. При восстановлении формы пера рабочей лопатки методом лазерной наплавки происходит послойное нанесение на подготовленную поверхность пера лопатки восстанавливающей стали путем расплавления основы и присадочного материала. Вследствие того, что основа подплавляется минимально, свойства восстановленного участка определяются свойствами присадочного материала и технологией его нанесения.

Роботизированный комплекс, используемый в установке восстановления пера лопатки методом лазерно-порошковой наплавки, позволяет выбрать оптимальные режимы восстановления формы, обеспечивая высокое качество ремонта и продление срока службы лопаток.

Ключевые слова: паровая турбина, эрозионная поврежденность, восстановление пера лопатки, лазерно-порошковая наплавка, роботизированный комплекс.

Для цитирования: Настека Д.В., Лебедева А.И. Использование роботизированного комплекса при восстановлении рабочих лопаток паровых турбин // Вестник МЭИ. 2018. № 6. С. 27—32. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-27-32.

Using a Robotic System in Repairing Steam Turbine Rotor Blades

D.V. Nasteka, A.I. Lebedeva

Application of advanced innovative methods for carrying out restorative repair of steam turbine rotor blades is a topical issue for the Russian power industry. Laser-powder surfacing technique is one of such methods.

Rotor blades used in the last stages of steam turbine low-pressure cylinders (LPC) operate under the conditions of a two-phase steam flow, which causes erosion wear of the blade leading edges. Attempts to increase the steam turbine capacity involve the use of longer LPC last-stage rotor blades. This, in turn, leads to higher circumferential velocities at the blade periphery and to a more intensive erosion wear. As a result, the rotor blade airfoil streamlining aerodynamics becomes deteriorated, the stage efficiency is degraded, and cracks able to cause rotor blade failure may develop in the blade airfoil part. In view of a high cost of new LPC last-stage rotor blades, it is economically expedient to restore the rotor blade's damaged leading edge using various technologies, including the following ones: argon-arc, plasma, and gas-powder surfacing of the base material; electro-spark alloying of the rotor blade leading edge surface layer; application of ion-plasma coatings to the blade airfoil surface; and stellite plate brazing.

As is known, martensite steel grades 12Kh13, 20Kh13, 15Kh11MF, and EI-961 are the main materials used to manufacture rotor blades. In view of this circumstance, minimizing the thermal influence on the base material to avoid possible formation of areas with increased hardness is an essential condition for successfully performing the rotor blade restoring operations. The use of laser surfacing technology fully meets this condition. In restoring the rotor blade airfoil shape using the laser surfacing method, the restoring steel is applied, in a layer-wise manner, to the prepared blade airfoil surface by melting the base and the filler material. Since the base is molten to a minimal extent, the restored area properties are determined by the filler material properties and by the technology of its application.

The robotic system applied in the installation for restoring the blade airfoil using the laser powder surfacing method allows the operator to select the optimal shape restoration conditions, thus ensuring high quality of repair and extension of the blade service life.

Key words: steam turbine, erosion damage, blade airfoil restoration, laser powder surfacing, robotic system.

For citation: Nasteka D.V., Lebedeva A.I. Using a Robotic System in Repairing Steam Turbine Rotor Blades. MPEI Vestnik. 2018;6:27—32. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-27-32.

Повышение экономичности, надежности и ресурса паровых турбин во многом связано с надежностью рабочих лопаток последних ступеней, работающих во влажном паре. Входные кромки рабочих лопаток при этом подвергаются эрозионному износу. Чем длиннее лопатки и выше степень влажности пара, тем интенсивнее эрозионное повреждение.

В настоящее время для мощных паровых турбин длина стальных рабочих лопаток составляет 1,2 м при окружной скорости на периферии 697 м/с [1]. Рост мощности турбин связан с увеличением длины лопаток последних ступеней цилиндра низкого давления (ЦНД) и повышением окружных скоростей на периферии лопатки до 900 м/с (для лопаток из титановых сплавов), что ведет к увеличению износа лопаток от каплеударной эрозии. Кроме того, на периферии лопатки реальная степень влажности в 3...4 раза выше диаграммной, находящейся на уровне 10...12% [2, 3]. Пример эрозионного разрушения рабочей лопатки последней ступени ЦНД турбины Т-250/300-23,5 приведен на рис. 1.

Для паровых турбин мощностью от 60 до 300 МВт снижение мощности ступени в зависимости от степени эрозионного износа составляет от 1,5 до 6,4% [5].

На ТЭЦ ОАО «Мосэнерго» придерживаются различных зимних режимов работы, что подтверждается отличающимся по интенсивности эрозионным износом и разными периодами замены лопаток. Время эксплуатации рабочих лопаток последних ступеней ЦНД турбины Т-250/300-23,5, установленное заводом-изготовителем, составляет в среднем 70...85 тыс. ч. Однако, на турбинах ТЭЦ-25 и ТЭЦ-26 лопатки 31-й и 40-й ступеней меняли во время третьего по счету капитального ремонта. На ТЭЦ-23 первая замена лопаток выполнена во второй по счету капитальный ремонт и время эксплуатации рабочих лопаток до их замены составило 40...50 тыс. ч, что существенно меньше планового ресурса [6].

Многолетние статистические данные по эксплуатации 25 теплофикационных турбин Т-100/130-12,8 и 15 турбин Т-250/300-23,5 показали, что из-за повреждений вследствие каплеударной эрозии ресурс рабо-

чих лопаток последних ступеней составляет в среднем 50 тыс. ч [7].

Зачастую причиной поломки рабочих лопаток является зарождение усталостных трещин в результате эрозионного износа поверхности пера. Замена лопаток — довольно дорогостоящий процесс, в связи с чем проблема продления паркового ресурса лопаточного аппарата путем восстановительного ремонта — одна из наиболее актуальных в отечественной энергетике.

Перспективным методом восстановительного ремонта считается метод лазерно-порошковой наплавки [8]. Его используют и для нанесения защитных эрозионно стойких покрытий на перо рабочих лопаток ЦНД паровых турбин. Данная технология, разработанная ООО «ТСЗП», была использована для повышения эрозионной стойкости рабочих лопаток двух последних ступеней ЦНД турбины К-200-12,8 на Заинской ГРЭС [9]. Суть метода состоит в нанесении на поверхность обрабатываемого изделия покрытия путем расплавления основы и присадочного материала. Поскольку основа подплавляется минимально, то свойства покрытия главным образом зависят от свойств присадочного материала.

Основной материал, используемый для рабочих лопаток, — стали мартенситного класса марок 12Х13, 20Х13, 15Х11МФ, ЭИ-961, и существенное условие успешного проведения операции восстановления рабочей лопатки заключается в минимизации теплового воздействия на основной материал для исключения возможного формирования зон подкалочных структур. Применение технологий лазерной наплавки полностью отвечает данному условию.

Активация контактной поверхности при наплавке осуществляется путем воздействия сфокусированного излучения, вызывающего локальный нагрев с образованием ванны расплава, в которую подается присадочный материал [8].

Порошковый материал доставляют в зону лазерного излучения газом — аргоном. Помимо транспортировки аргон также выполняет функцию защитного газа, предотвращая окисление металла при наплавке. При этом подача присадочного материала осуществляется по схеме, приведенной на рис. 2.



Рис. 1. Эрозионный износ входных кромок рабочих лопаток турбины Т-250/300-23,5 [4]

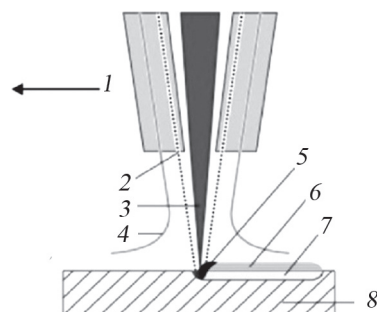


Рис. 2. Схема процесса лазерной наплавки:

1 — направление перемещения; 2 — порошок; 3 — луч лазера; 4 — защитный (транспортный) газ; 5 — расплавленная зона; 6 — наносимый материал; 7 — зона наплавки; 8 — деталь

При лазерно-порошковой наплавке частицы порошка начинают нагреваться в зоне лазерного излучения до попадания на поверхность, однако полностью расплавляются только на обрабатываемой поверхности [10].

Технологии лазерной обработки и наплавки — методы высокоточные, следовательно, необходимо соблюдать высокую точность позиционирования. Отклонение фокуса лазерного излучения на 3...5 мм может стать критичным для качества выполнения наплавки. Таким образом, проводить лазерно-порошковую наплавку вручную практически невозможно. Для успешной работы с ней применяют роботизированные комплексы таких производителей, как Kuka, ABB и др.

Роботизированный комплекс (рис. 3) состоит из робота-манипулятора, шкафа и пульта управления, а также кабельной обвязки.

Робот-манипулятор имеет шесть осей вращения, благодаря которым легко перемещается в рабочем пространстве (рис. 4). Для его настройки следует ввести несколько осей координат (рис. 5).

В первую очередь, относительно помещения, в котором располагается роботизированный комплекс, выставляют неподвижную систему координат «\$WORLD». Затем внутри «\$WORLD» выстраивают собственную систему координат «\$ROBOT», где центром осей является точка установки робота. Кроме того, относительно «\$WORLD» создают систему координат объекта наплавки «\$BASE». В настоящем случае объектом наплавки является рабочая лопатка последней ступени ЦНД турбины К-300-23,5 ЛМЗ, подлежащая восстановительному ремонту. Следует отметить, что \$ROBOT и \$BASE непрерывно связаны друг с другом системой координат \$WORLD. Не менее важна

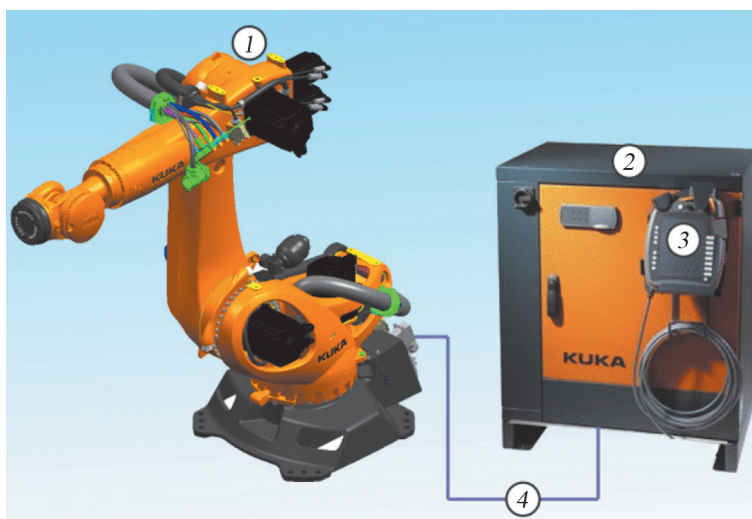


Рис. 3. Роботизированный комплекс Kuka KR-16:

1 — робот-манипулятор; 2 — шкаф управления; 3 — пульт управления; 4 — кабельная обвязка



Рис. 4. Оси вращения робота-манипулятора

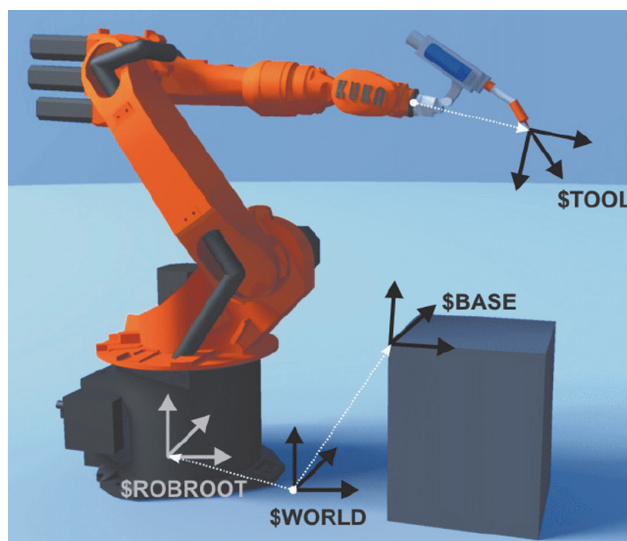


Рис. 5. Системы координат роботизированного комплекса

система координат рабочего инструмента «\$TOOL». Ее программирование необходимо для точного определения лазерной оптической головы в пространстве системы координат \$WORLD (рис. 6).

Лазерную оптическую голову устанавливают на концевую часть робота-манипулятора (ось А6), затем настраивают \$TOOL, для чего выбирают произвольную контрольную (отсчетную) точку. Она же является пересечением осей координат \$TOOL.

Потом рабочей точкой лазерной оптической головки (точкой фокусирования лазерного излучения, т. е. точкой, в которую сфокусирована подача порошкового материала; как правило располагается на расстоянии 20 мм от среза порошкового сопла вдоль оси лазерного излучения) при помощи пульта управления манипулятором выполняется подвод к отсчетной точке с четырех различных направлений. Исходя из различных позиций, система управления роботом самостоятельно рассчитывает систему координат \$TOOL.

Особенность робота-манипулятора заключается в том, что он выполняет поставленные задачи по заранее сформированной управляющей программе, в которой прописаны действия с привязкой к системе координат: передвижения инструмента в пространстве, моменты включения/выключения лазерного излучения и подачи порошкового материала, скорость перемещения инструмента (лазерного излучения) и т. п.

Следует отметить, что в управляющей программе имеется возможность программирования только параметров самого робота. Данные по лазерному излучению и подаче порошкового материала задаются на пульте управления лазерной установки.



Рис. 6. Лазерная оптическая голова, зафиксированная на роботе-манипуляторе, и рабочая лопатка в процессе восстановления

Основные корректируемые характеристики:

- мощность лазерного излучения, регулируемая в диапазоне от 500 до 2500 Вт;
- подача порошкового материала в зону лазерной наплавки, варьируемая в диапазоне 0...150 гр/мин;
- подача защитного газа (аргон) в зону лазерной наплавки в диапазоне 0...30 л/мин;
- скорость перемещения лазерного излучения, изменяемая от 0 до 0,5 м/с.

Исходя из представленных параметров, можно подобрать режим наплавки, позволяющий получить высокое качество восстановления пера рабочей лопатки [11].

Восстановительный ремонт пера эрозионно поврежденной рабочей лопатки с использованием технологий лазерно-порошковой наплавки характеризуется криволинейной геометрией восстановления [12]. Схематичное изображение восстановленной входной кромки пера рабочей лопатки представлено на рис. 7.

Наиболее качественный слой обладает толщиной 0,6...0,8 мм, поэтому наплавка выполняется послойно, постепенно восстанавливая первоначальную геометрию. При выполнении наплавки каждого слоя следует соблюдать точное расстояние от среза порошкового сопла лазерной оптической головки (в данном случае 21 мм). Это достигается правильным формированием управляющей программы робота-манипулятора.

Механизм формирования траектории движения следующий: робот перемещает лазерную оптическую голову по заранее запрограммированным точкам (рис. 8). Вначале лазерная оптическая голова подводится к месту на поверхности пера лопатки, с которого должно начаться формирование наплавляемого валика (точка 1, рис. 8). Координаты положения лазерной оп-

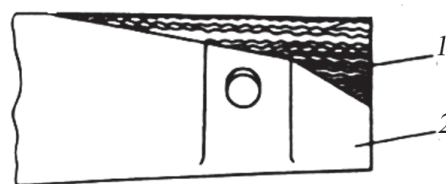


Рис. 7. Схема лазерно-порошковой наплавки при восстановлении формы пера рабочей лопатки.

1 — восстановленный участок; 2 — поврежденная рабочая лопатка

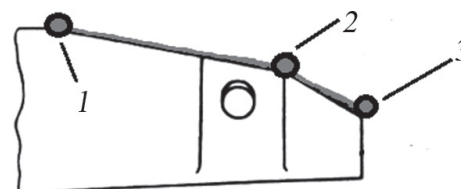


Рис. 8. Единичный слой лазерно-порошковой наплавки: 1 — 3 — запрограммированные точки перемещения робота-манипулятора

тической головы фиксируются автоматически и запоминаются в первой точке.

Аналогично программируются точки 2 и 3. Все точки расположены на поверхности пера лопатки, подлежащей восстановительному ремонту. К положению точки 1 привязывают старт лазерного излучения и подачи порошкового материала в зону наплавки, к положению точки 3 — окончание наплавочного процесса. Для обеспечения передвижения лазерной оптической головы от точки 1 к точке 2 формируется команда перемещения.

Важным параметром лазерно-порошковой наплавки является скорость перемещения лазерного излучения, и, соответственно, скорость перемещения робота-манипулятора [13]. Ее оптимальное значение подбирают опытным путем. Оценивают визуальное состояние наплавленного валика, наличие трещин, непроплавов, отслоений, проверяют микроструктуру поперечного шлифа валика на наличие внутренних трещин, просматривают границу сплавления с материалом основы на предмет дефектов. При скорости перемещения лазерного излучения, превышающей оптимальную, снижается толщина наплавленного слоя, что сказывается на длительности восстановления пера лопатки. Кроме того, при этом режиме снижается уровень сплавления порошкового материала с основой, т. е. сварочная ванна не успевает образовываться, возникают непроплавы. При скорости перемещения ниже оптимальной наблюдается повышенное тепловложение в материал основы, и растет уровень растягивающих напряжений в наплавленном слое, что приводит к тепловым деформациям пера лопатки и образованию трещин.

Литература

1. Рыженков В.А., Лебедева А.И., Медников А.Ф. Современное состояние и способы решения проблемы эрозионного износа лопаток влажно-паровых ступеней турбин // Теплоэнергетика. 2011. № 9. С. 8—13.
2. Орлик В.Г., Качуринер Ю.Я., Червонный В.Ф. Эрозия рабочих лопаток последних ступеней турбин при пусковых и малорасходных режимах // Электрические станции. 2007. № 4. С. 6—10.
3. Симою Л.Л., Эфрос Е.И., Гуторов В.Ф. Влияние режимных факторов на интенсивность эрозионных повреждений лопаточного аппарата теплофикационных турбин // Электрические станции. 2000. № 10. С. 12—18.
4. Должанский П.Р., Доброхотов С.Э. Повышение эксплуатационной надежности рабочих лопаток последних ступеней турбин Т-250/300-240 // Надежность и безопасность энергетики. 2008. № 1. С. 56—59.
5. Гонсеровский Ф.Г., Силевич В.М. Продление срока службы узлов деталей проточной части турбин ТЭС и АЭС // Тяжелое машиностроение. 2002. № 10. С. 59—63.
6. Щедролюбов В.Л. и др. Замена и ремонт лопаток последних ступеней паровых турбин // Энергетик. 2002. № 2. С. 37—39.

По результату наплавки одного слоя в управляющей программе задается смещение координат точек 1 — 3 в зависимости от толщины наплавленного слоя, и процесс наплавки повторяется до достижения требуемых геометрических параметров (рис. 8).

Процесс лазерно-порошковой наплавки полностью автоматизирован, управляющие программы под каждый профиль лопатки создаются единожды, а потом лишь адаптируются к следующей лопатке. Известно, что снижение участия человеческого фактора в процессе производства работ положительно влияет на качество и повторяемость. За счет своих уникальных свойств метод лазерной наплавки является перспективным методом восстановления эрозионно-поврежденных рабочих лопаток паровых турбин.

Таким образом, анализ эксплуатационной поврежденности пера рабочих лопаток ЦНД паровых турбин показал, что время до замены рабочих лопаток составляет 40...50 тыс. ч, и из-за высокой стоимости новых лопаток наиболее экономически целесообразен восстановительный ремонт с помощью лазерно-порошковой наплавки.

Благодаря применению роботизированного комплекса процесс наплавки полностью автоматизирован, что положительно влияет на качество и повторяемость результатов восстановительного ремонта.

Высокое качество обеспечивается разработкой управляющих программ для каждого профиля лопатки с целью создания оптимальной толщины наплаваемого слоя 0,6...0,8 мм при послойной наплавке с заданной скоростью перемещения лазерного излучения.

References

1. Ryzhenkov V.A., Lebedeva A.I., Mednikov A.F. *Sovremennoe Sostoyanie i Sposoby Resheniya Problemy Eroziionnogo Iznosa Lopatok Vlazhno-parovyh Stupeney Turbin*. *Teploenergetika*. 2011;9:8—13. (in Russian).
2. Orlik V.G., Kachuriner Yu.Ya., Chervonnyy V.F. *Eroziya Rabochih Lopatok Poslednih Stupeney Turbin Pri Puskovyh i Maloraskhodnyh Rezhimah*. *Elektricheskie Stantsii*. 2007;4:6—10. (in Russian).
3. Simoyu L.L., Efros E.I., Gutorov V.F. *Vliyanie Rezhimnyh Faktorov na Intensivnost' Eroziionnyh Povrezhdeniy Lopatochnogo Apparata Teplofikatsionnyh Turbin*. *Elektricheskie Stantsii*. 2000;10:12—18. (in Russian).
4. Dolzhanskiy P.R., Dobrohotov S.E. *Povyshenie Ekspluatatsionnoy Nadezhnosti Rabochih Lopatok Poslednih Stupeney Turbin T-250/300-240*. *Nadezhnost' i Bezopasnost' Energetiki*. 2008;1:56—59. (in Russian).
5. Gonserovskiy F.G., Silevich V.M. *Prodlenie Sroka Sluzhby Uzlov Detaley Protochnoy Chasti Turbin TES i AES*. *Tyazheloe Mashinostroenie*. 2002;10:59—63. (in Russian).
6. Shchedrolyubov V.L. i dr. *Zamena i Remont Lopatok Poslednih Stupeney Parovyh Turbin*. *Energetik*. 2002;2:37—39. (in Russian).

7. **Микунис С.И.** Надежность рабочих лопаток последних ступеней ЦНД турбоагрегатов // Электрические станции. 1997. № 12. С. 34—40.

8. **Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И.** Технологические процессы лазерной обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.

9. **Грачев О.Е., Неуймин В.М., Настека Д.В.** Повышение эффективности ремонтов, изготовления и эксплуатации оборудования ТЭС путем применения газотермического нанесения покрытий и лазерной наплавки // Известия высш. учеб. заведений и энергетических Объединений СНГ. Серия «Энергетика». 2015. № 6. С. 55—61.

10. **Григорьянц А.Г.** Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989.

11. **Valsecchi B., Previtali B., Gariboldi E.** Fibre Laser Cladding of Turbine Blade Leading Edges: the Effect of Specific Energy on Clad Dilution // Intern. J. Structural Integrity. 2012. V. 3. Iss. 4. Pp. 377—395.

12. **Brandt M., Sun S., Alam N., Bendeich P., Bishop A.** Laser Cladding Repair of Turbine Blades in Power Plants: from Research to Commercialisation // Intern. Heat Treatment and Surface Eng. 2009. V. 3. No. 3. Pp. 105—114.

13. **Семенов Е.Н., Сидорова А.В.** Эффективное зонирование рабочего пространства промышленного робота Kuka // Вестник ИГТУ. 2015. № 12. С. 86—96.

7. **Mikunis S.I.** Nadezhnost' Rabochih Lopatok Poslednih Stupeney TSND Turboagregatov. Elektricheskie Stantsii. 1997;12:34—40. (in Russian).

8. **Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I.** Tekhnologicheskie Protsessy Lazernoy Obrabotki. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2008. (in Russian).

9. **Grachev O.E., Neuymin V.M., Nasteka D.V.** Povyshenie Effektivnosti Remontov, Izgotovleniya i Ekspluatatsii Oborudovaniya TES Putem Primeneniya Gazotermicheskogo Naneseniya Pokrytiy i Lazernoy Naplavki. Izvestiya Vyssh. Ucheb. Zavedeniy i Energeticheskikh Ob'edineniy SNG. Seriya «Energetika». 2015;6:55—61. (in Russian).

10. **Grigor'yants A.G.** Osnovy Lazernoy Obrabotki Materialov. M.: Mashinostroenie, 1989. (in Russian).

11. **Valsecchi B., Previtali B., Gariboldi E.** Fibre Laser Cladding of Turbine Blade Leading Edges: the Effect of Specific Energy on Clad Dilution. Intern. J. Structural Integrity. 2012;3;4:377—395.

12. **Brandt M., Sun S., Alam N., Bendeich P., Bishop A.** Laser Cladding Repair of Turbine Blades in Power Plants: from Research to Commercialisation. Intern. Heat Treatment and Surface Eng. 2009;3;3:105—114.

13. **Semenov E.N., Sidorova A.V.** Effektivnoe Zonirovaniye Rabochego Prostranstva Promyshlennogo Robota Kuka. Vestnik IGTU. 2015;12. С. 86—96. (in Russian).

Сведения об авторах:

Настека Денис Владимирович — руководитель направления по технической политике ООО «КВАРЦ Групп», e-mail: d.nasteka@mail.ru

Лебедева Александра Ивановна — кандидат технических наук, доцент кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ», e-mail: LebedevaAI@mpei.ru

Information about authors:

Nasteka Denis V. — Head of Technical Policy Direction of Open Company «QUARTZ Group», e-mail: d.nasteka@mail.ru

Lebedeva Aleksandra I. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Steam and Gas Turbines named A.V. Shcheglyayev Dept., NRU MPEI, e-mail: LebedevaAI@mpei.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 09.06.2018

The article received to the editor: 09.06.2018