

6. Ларин, С.Н., Платонов, В.И., Куприн, Е.П., Яковлев, С.С. (мл). Подход к оценке повреждаемости при деформировании стрингерных конструкций с цилиндрическими каналами по различным теориям ползучести и повреждаемости // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – Вып. 3. – С. 3–14.

7. Демин, В.А. Исследование связи между предельным коэффициентом вытяжки и группой штампуемости стали для холодной штамповки // Известия Тульского государственного университета. – 2017. – Вып. 12. – Ч. 2. – С. 262–268.

REFERENCES

1. Demin, V.A. Design of innovation technologies in metal forming // *Science Intensive Techniques in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.8 (74). – pp. 3-6.

2. Allenov, M.G., Belokurov, O.A. Macrostructure fiber direction impact in steel forged pieces upon wear of products made of them // *Bulletin of STANKIN MSTU*. – 2016. – No.4 (39). – pp. 67-70.

3. Demin, V.A. *Thick-Sheet Stamping Design Based on Technological Failures Prediction*. – М.: Mechanical Engineering-1, 2002, - pp. 186. ISBN 5-94275-035-1

4. Vlasov, A.V. On Cocroft-Latham criterion application for failure prediction at cold die forging // *Bulletin of Tula State University. Engineering Sciences*. – 2017. – Edition 11. – Part.1. – pp. 46-58.

5. Demin, V.A., Romasenko, A.V., Kostylev, V.A. Hole folding for threading higher of M6 // *Pre-Production in Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol.15. – No.8. – pp. 357-360.

6. Larin, S.N., Platonov, V.I., Kuprin, E.P., Yakovlev, S.S. (young). Approach to damageability estimate at deformation of stringer structures with cylindrical channels on different areas of creep and damageability // *Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences*. – 2016. – Edition 3. – pp. 3-14.

7. Demin, V.A. Investigation of ties between limiting drawing ratio and group of steel stamping for cold forming // *Proceedings of Tula State University*. – 2017. – Edition 12. – Vol.2. – pp. 262-268.

Рецензент д.т.н. Б.М. Базров

УДК 621.9: 658.512

DOI: 10.12737/article_5a8ef9cb7d0fc9.83528290

М.Л. Хейфец, д.т.н., В.И. Бородавко, ген. директор, А.М. Пынькин, зам. ген. директора, Н.Л. Грецкий, н.с. (ГНПО «Центр» НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь)
E-mail: mlk-z@mail.ru

Технологический процесс электронно-лучевой сварки пакета лопаток паровых турбин

Предложена технология изготовления пакета лопаток паровых турбин из жаропрочной высоколегированной трудносвариваемой стали мартенситного класса. Описано преимущество применения электронно-лучевой сварки при сборке пакета лопаток вместо традиционного электродугового способа сварки в защитной среде. Рассмотрена специально спроектированная технологическая оснастка необходимая для автоматизации процесса сварки.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка; пакеты лопаток паровых турбин; концентрированные потоки энергии; трудно-свариваемые стали мартенситного класса.

M.L. Heifets, D. Eng., V.I. Borodavko, general Director, A.M. Pynkin, deputy general Director, N.L. Gretskey, r. a., (SSPC "Center" NAS of Belarus, Minsk, Belarus)

Engineering procedure in electron-beam welding of blade packet for steam turbines

A technology for manufacturing a steam turbine blade packet made of heat-resistant high-alloy hard-to-weld steel of a martensitic class is offered. The advantage of electron-beam welding use at the assembly of a blade packet instead of a common electric arc welding method in protective environment is described. A technological tooling specially designed essential for welding process automation is considered. There are shown results of laser scanning a blade packet geometry with the aid of NikonMetrology MCAx40+ coordinate measuring arm with the further computer analysis of results obtained in applied Focus software which has shown that thermal deformations are within the limits of a tolerance for the mentioned operation and exclude completely further processing.

The application of electron-beam welding at manufacturing a blade packet allows increasing assembly quality, decreasing defects and cost price of an engineering process.

Keywords: electron beam welding; packets of steam turbine blades; concentrated energy flows; hard-to-weld steels of martensitic class.

Паровая турбина – самая значимая и самая дорогостоящая часть тепловых электростанций. Во время работы она подвергается интенсивному воздействию высоких температур, коррозии, эрозии, и в результате ее детали испытывают статические, динамические и температурные напряжения [1 – 3].

Рабочие лопатки являются одними из ответственных элементов турбины и наиболее напряженных деталей, определяющих во многом надежность и срок службы паровой турбины. Они испытывают напряжения – от растяжения и от изгиба, вызываемых действием центробежных сил, а также сил, возникающих вследствие изменения направления движения газа в межлопаточных каналах.

Лопатки испытывают также переменные напряжения от вибрации со знакопеременной амплитудой. Величина этих напряжений может достигать больших значений. Кроме того, лопатки находятся под действием высокой температуры, которая снижает механические свойства материала. От качества материала, изготовления и установки лопаточного аппарата в значительной степени зависит надежность и экономичность эксплуатации турбины. Тяжелые условия работы лопаточного аппарата определяют те высокие требования, которым они должны соответствовать [4, 5].

Лопатки первой ступени изготавливают с цельно-фрезерованным профилем в едином

целом с участком банджа и хвостовой части и передают на сборку в виде пакета из двух лопаток, сваренных между собой по бандажу и хвосту. При наборе лопаток на диск между бандажными каждой пары лопаток выдерживается зазор от 0,3 до 0,8 мм, замыкается каждый ряд лопаток замковыми пакетами (рис. 1). После набора лопаток на диск производится механическая обработка бандажей и гребешков уплотнений [6, 7].

Материалы, применяемые при изготовлении лопаток паровых турбин. Поскольку лопатки турбин работают в тяжелых условиях высоких температур и нагрузок, их изготавливают из жаропрочных сталей [4]. В ГНПО «Центр» НАН Беларуси при изготовлении пакета лопаток используется жаропрочная высоколегированная сталь мартенситного класса 15X11МФ, химический состав которой приведен в табл. 1.

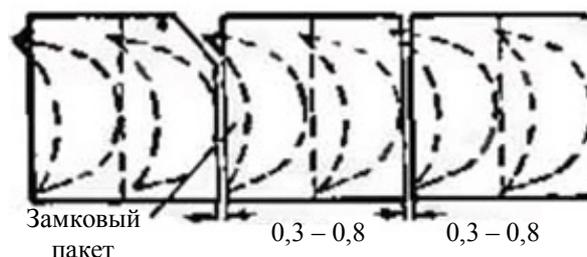


Рис. 1. Вид сверху на бандажии сварных пакетов рабочих лопаток с замковым пакетом

1. Химический состав применяемой стали [8]

Обозначение	Массовая доля элементов, %								
	Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Молибден	Ванадий	Железо	Сера	Фосфор
15X11МФ	0,12...0,19	Не более 0,50	Не более 0,70	10,00...11,50	0,60...0,80	0,25...0,40	Осн.	Не более 0,025	Не более 0,030

Технологический процесс электронно-лучевой сварки. Для повышения качества сборки и снижения количества брака при сварке пакета лопаток паровых турбин [9, 10], вместо традиционного электродугового способа сварки в защитной среде, предложено применять электронно-лучевую сварку (ЭЛС) на специальных режимах с предварительным и последующим подогревом зоны сварки расфокусированным электронным лучом (рис. 2).

Повышенная концентрация энергии луча обуславливает высокую скорость сварки и позволяет получать швы не только с минимальной зоной расплавленного металла, но и соединения, в которых металл околошовной зоны не претерпевает значительных изменений

вследствие минимизации количества теплоты. Малая погонная энергия при ЭЛС способствует снижению зоны термического влияния, исключает недостатки, вызванные изменением физико-механических свойств металла в околошовной зоне.

Глубокое проплавление металла при ЭЛС позволяет исключить необходимость выполнения разделки кромок перед сваркой. Кроме того, минимизация количества теплоты дает возможность уменьшить деформации изделий по сравнению с дуговым способом сварки. Высокий вакуум в камере ЭЛС способствует высокой чистоте сварочной ванны и дегазации сварочного шва.

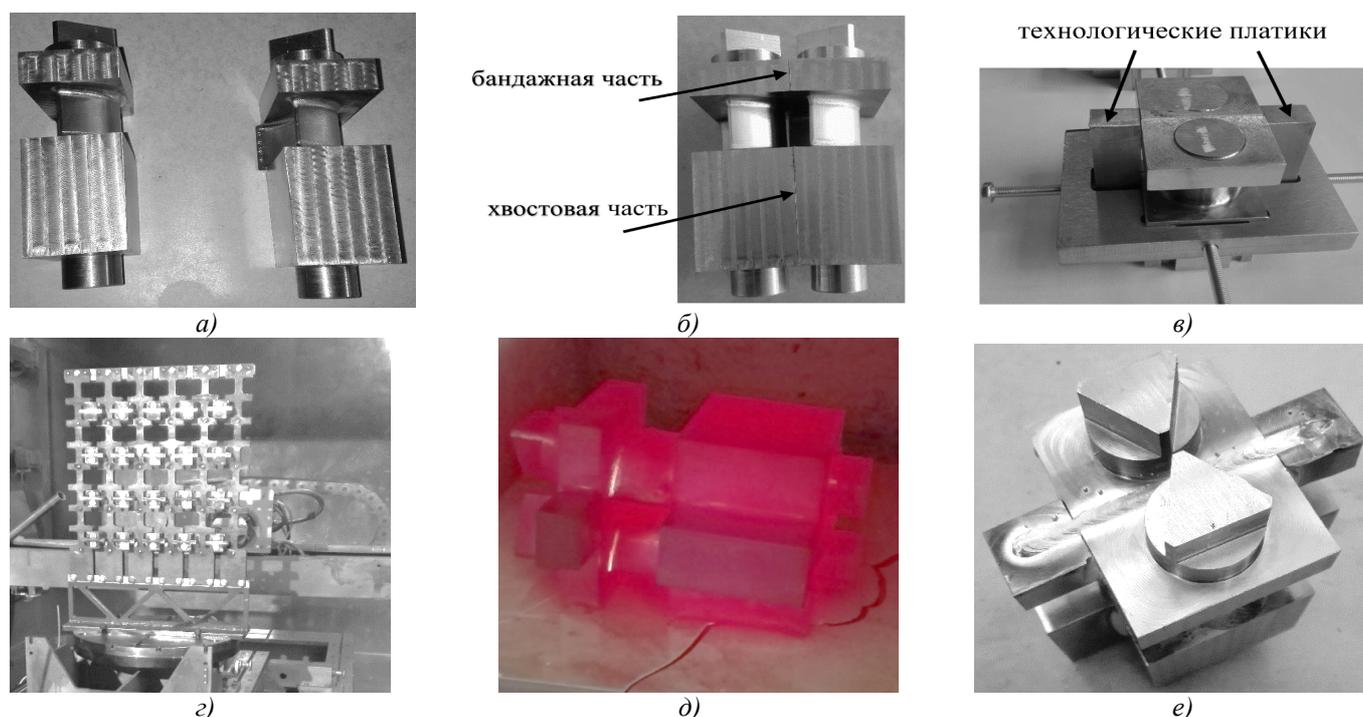


Рис. 2. Технологический процесс и средства оснащения электронно-лучевой сварки пакета лопаток паровых турбин:

а – лопатка; *б* – пакет лопаток; *в* – сборка в кассеты пакетов лопаток турбин с технологическими пластиками; *г* – многоместная технологическая оснастка в камере; *д* – термообработка пакета лопаток для снятия внутренних напряжений после сварки; *е* – пакет лопаток после сварки и термообработки

Технологические возможности электронно-лучевого комплекса КЛ 156, разработанного Институтом электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, позволяют обеспечить: высокое качество сварного соединения по всей глубине при уникальных соотношениях «глубина/ширина» (до 20:1) и «цена/качество»; прочностные характеристики сварного шва и околошовной зоны, не уступающие характеристикам основного материала; резкое снижение тепловложения в изделие, исключая значительные термические деформации.

Система автоматизированного управления позволяет формировать финишные и косметические сварные соединения по сложной (трехмерной) траектории, а прецизионная оснастка (одновременно до 5 координат) дает возможность решать сложные задачи по высокоточной сварке, как в единичном, так и в серийном производстве.

Сборка лопаток (рис. 2, *а*) в пакеты производится ЭЛС по стыку участков бандажной и хвостовой частей (рис. 2, *б*) на всю глубину без разделки кромок. Для входа и выхода электронного луча предусмотрены технологические пластики (рис. 2, *в*), которые удаляются при последующей механической обработке. Пакет, состоящий из двух лопаток и технологических пластиков, собирается и базируется в

кассету (рис. 2, *в*), которая устанавливается в многоместной технологической оснастке (рис. 2, *г*).

Разработанная многоместная технологическая оснастка позволяет автоматизировать процесс ЭЛС и производить до 40 пакетов лопаток за одну установку. Учитывая повышенную склонность к хрупкому разрушению жаропрочных сталей мартенситного класса после сварки, пакеты лопаток после ЭЛС незамедлительно подвергаются термической обработке (отпуску) для снятия внутренних напряжений и формирования требуемых механических свойств (рис. 2, *д*). Далее пакет лопаток (рис. 2, *е*) поступает на окончательную механическую обработку, где удаляются пластики и окончательно формируются посадочные и присоединительные места при обеспечении требуемых размеров, форм и допусков (рис. 3).

Контроль и диагностика электронно-лучевой сварки. После ЭЛС и снятия внутренних напряжений выполняется визуальный осмотр лопаток с целью выявления механических повреждений и других нарушений качества поверхности. Далее для диагностики сварного соединения проводится ультразвуковой дефектоскопический контроль на наличие пор, неметаллических включений и микротрещин в шве и околошовной зоне [11]. Затем изготавливаются микрошлифы, которые под-

вергаются травлению перед металлографическим исследованием на микроскопе MeijiTechno MT8500 с помощью программного пакета SIAMS 800 (рис. 4).

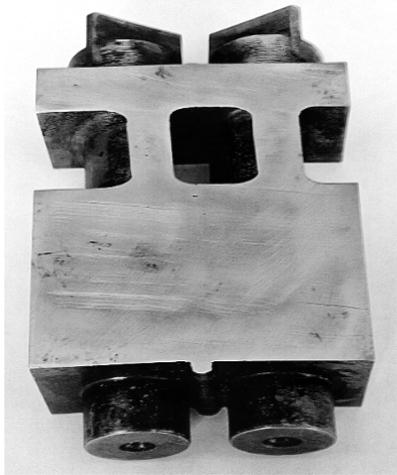


Рис. 3. Пакет лопаток после сварки, термической и механической обработки

Дополнительно проводятся контрольные измерения изменений геометрии деталей и определяются зоны термической деформации. Измерения до сварки и после производятся путем лазерного сканирования пакета лопаток с помощью координатно-измерительной руки NikonMetrology MCAx40+ (рис. 5) с последующим компьютерным анализом полученных результатов в прикладной программе Focus.

Числовые значения отклонений определя-

ются в автоматическом режиме и представляются в виде цветовой карты отклонений (рис. 6).

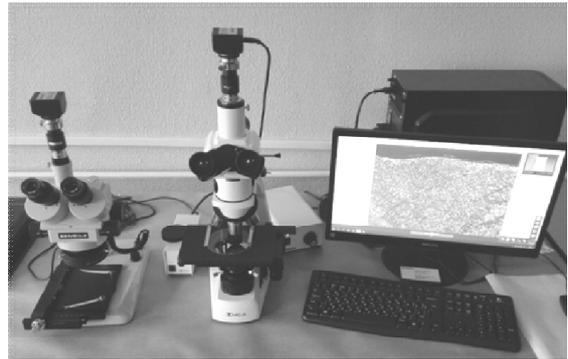


Рис. 4. Микроструктурный анализ шлифов сварочного соединения пакета лопаток на микроскопе MeijiTechno MT8500 с помощью программного пакета SIAMS 800



Рис. 5. Лазерное сканирование пакета лопаток с помощью координатно-измерительной руки NikonMetrology MCAx40+

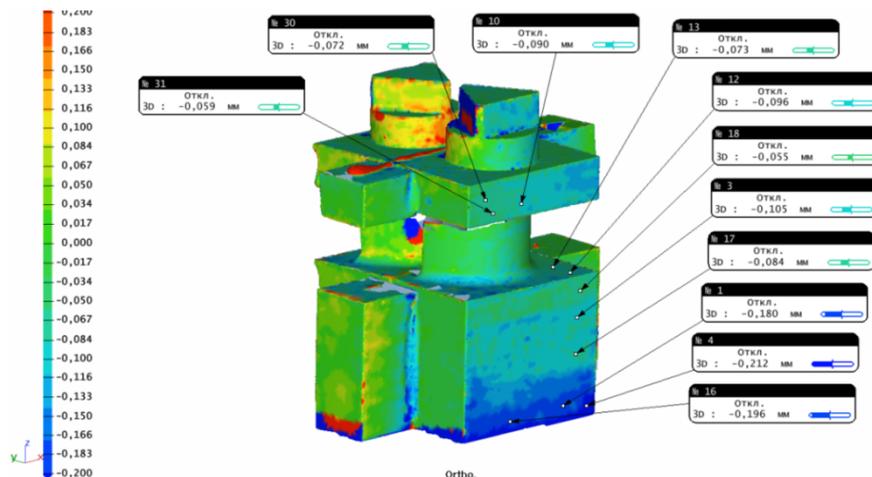


Рис. 6. Цветовая карта измерений зон термической деформации

При сравнении полученных результатов с номинальными САД-данными, формируются абсолютно четкие изображения имеющих геометрических отклонений. Контроль сложных поверхностей соответствует требованиям изучения упругого последствие и усадоч-

ных деформаций материалов после ЭЛС. Благодаря измерениям, зарегистрированным при помощи сканера, программа с высокой точностью определяет геометрические отклонения от САД модели на стадиях до и после ЭЛС.

При обработке на предложенных режимах

существенных дефектов сварочного шва не обнаружено.

В результате проведенных измерений в бандажном шве пакета лопаток деформация не заметна (максимальное отклонение -0,09 мм). Зона максимальных термических деформаций при ЭЛС выявлена в хвостовом шве, в верхней его части, и составляет -0,212 мм. В зоне корня шва термическая деформация незначительна (максимальное отклонение -0,096 мм).

Термические деформации лежат в пределах допуска на данной операции и исключают последующую механическую обработку.

Заключение

Разработан технологический процесс и средства его оснащения для изготовления пакета лопаток паровых турбин из жаропрочной высоколегированной трудно-свариваемой стали мартенситного класса.

Показаны преимущества применения электронно-лучевой сварки при сборке пакета лопаток вместо традиционного электродугового способа сварки в защитной среде. Глубокое проплавление металла позволяет исключить разделку кромок перед электронно-лучевой сваркой, а минимизация количества теплоты дает возможность уменьшить деформации изделий по сравнению с дуговым способом сварки. Высокий вакуум в камере способствует повышенной чистоте сварочной ванны, дегазации сварочного шва, а в результате отсутствия конвективных течений, снижает интенсивность охлаждения.

Рассмотрена диагностика процесса сварки путем лазерного сканирования пакета лопаток с помощью координатно-измерительной руки NikonMetrology MCAx40+ с последующим компьютерным анализом полученных результатов в прикладной программе Focus, которая показала, что термические деформации лежат в пределах допуска на данной операции и исключают последующую механическую обработку.

Применение при изготовлении пакета лопаток электронно-лучевой сварки позволяет повысить качество сборки, снизить количество брака и себестоимость технологического процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Быстрицкий, Г.Ф. Основы энергетики. – М.: ИНФРА-М, 2006. – 277 с.
2. Трухний, А.Д., Макаров, А.А., Клименко, В.В. Основы современной энергетики. Часть 1. Современная теплоэнергетика – М.: Издательский дом МЭИ, 2002. – 367 с.
3. Дейч, М.Е. Техническая газодинамика. – М.: Энергия, 1974. – 592 с.
4. Резников, М.И., Липов, Ю.М. Паровые котлы тепловых электростанций. – М.: Энергоиздат, 1981. – 240 с.
5. Костюк, А.Г. Паровые и газовые турбины для электростанций: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. /

А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; под ред. А.Г. Костюка. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 556 с.

6. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки: учебное пособие для вузов / А.Д. Трухний, Б.В. Ломакин. 2-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 40 с.

7. Энергетические установки электростанций: учебник для вузов по специальностям "Электрические станции" и "Электрические системы и сети" / С.Я. Белинский, Ю.М. Липов. – М.: Энергия, 1974. – 304 с.

8. ГОСТ 5632-2014 "Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки"

9. Бородавко, В.И. Изготовление пакета лопаток паровых турбин с применением электронно-лучевых технологий / В.И. Бородавко, Н.Л. Грецкий, А.М. Пынькин, М.Л. Хейфец // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XXIV международной научно-технической конференции, в г. Севастополе 11-17 сентября 2017 г. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – С. 43–47.

10. Бородавко, В.И., Вабищевич, П.А., Грецкий, Н.Л., Пынькин, А.М., Пуляев, В.К., Волотовский, Ф.А., Корзун, А.Е., Хейфец, М.Л. Применение электронно-лучевой сварки при изготовлении пакета лопаток паровых турбин // Инженер-механик. – 2017. – № 2(75). – С. 27–30.

11. Корзун, А.Е., Волотовский, Ф.А., Бородавко, В.И., Пынькин, А.М., Гайко, В.А., Хейфец, М.Л. Управление производственными процессами в мехатронных технологических комплексах // Инженер-механик. – 2017. – № 1(74). – С. 18–20.

REFERENCES

1. Bystritsky, G.F. *Power Engineering Fundamentals*. – M.: INFRA-M, 2006. – pp. 277.
2. Trukhny, A.D., Makarov, A.A., Klimenko, V.V. *Modern Power Engineering Fundamentals. Part 1. Modern Heat-Power Engineering* – M.: MEI Publishing House, 2002. – pp. 367.
3. Deutsch, M.E. *Engineering Gas Dynamics*. – M.: Energy, 1974. – pp. 592.
4. Reznikov, M.I., Lipov, Yu.M. *Steam-Boilers of Thermoelectric Power Stations*. – M.: Energoizdat, 1981. – pp. 240.
5. Kostyuk, A.G., *Steam and Gas Turbines for Power Stations: college textbook, 3-d edition revised and supplemented / A.G. Kostyuk, V.V. Frolov, A.E. Bulkin, A.D. Trukhny; under the editorship of A.G. Kostyuk*. – M.: MEI Publishing House, 2008. – pp. 556.
6. *Dual Purpose Turbine Plants and Turbines: college manual / A.D. Trukhny, B.V. Lomakin*. 2-d stereotyped edition. – M.: MEI Publishing House, 2006. – pp. 40.
7. *Power Plants for Power Stations: college textbook for specialties "Power Stations" and "Electric Systems and Electric Means" / S.Ya. Belinsky, Yu.M. Lipov*. – M.: Energy, 1974. – pp. 304.
8. RSS 5632-2014 "Alloy Stainless Steel and Corrosion-Proof Heat Resistant Refractory Alloys. Grades"
9. Borodavko, V.I. Manufacturing blade packet for steam turbines using electron beam techniques / V.I. Borodavko, N.L. Gretskey, A.M. Pynkin, M.L. Heifets // *Mechanical Engineering and Techno-Sphere of the XXI-st Century: Proceedings of the XXIV Inter. Scientif.-Tech. Conf.*, Sevastopol, September 11-17, 2017. – Donetsk: DonNTU, 2017. – pp. 43-47.
10. Borodavko, V.I., Vybishchevich, P.A., Gretskey, N.L., Pynkin, A.M. Pulyaev, V.K. Volotovskiy, F.A., Korzun, A.E., Heifets, M.L. Electron beam welding use at blade packet manufacturing for steam turbines // *Engineer-Mechanic*. – 2017. – No.2 (75). – pp. 27-30.
11. Korzun, A.E., Volotovskiy, F.A., Borodavko, V.I., Pynkin, A.M., Gaiko, V.A., Heifets, M.L. Industrial process control in mechatronic technological complexes // *Engineer-Mechanic*. – 2017. – No.1 (74). – pp. 18-20.

Рецензент д.т.н. С.В. Кузьмин