РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ УСТАНОВКИ ХИМИЧЕСКОГО НИКЕЛИРОВАНИЯ, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЙ В СОСТАВЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ЛИНИИ

**А. Б. Борисенко, В. В. Храмцов, В. А. Немтинов,
А. В. Крылов, М. А. Матрохин**

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,
kafedra@mail.gaps.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: модернизация оборудования; оборудование гальванических производств; химическое никелирование.

Аннотация: Выполнен анализ требований к технологическому оборудованию для проведения процесса химического никелирования металлических изделий, в том числе из углеродистых сталей, титана, алюминия и сплавов на их основе. Перечислены недостатки стандартного оборудования (установки серии УХН, функционирующей как отдельная технологическая единица) при его эксплуатации в составе гальванической линии. Представлены результаты конструкторской разработки усовершенствованной установки для химического никелирования металлических изделий с многократным использованием раствора. Апробация установки в условиях гальванического участка реального механического производства показала ее высокую эффективность.

Введение

Ежегодно из-за коррозии (разрушения вследствие электрохимического или химического воздействия среды) преждевременно выходят из строя инженерные сооружения, машины и аппараты, суда, а также происходят несчастные случаи [1]. Для предохранения изделий от действия коррозии широко применяют различные виды защитных покрытий, предотвращающих контакт материала изделия с кислородом воздуха, водой и пр.

Среди защитных покрытий можно выделить металлические (в частности, цинк, хром, никель, олово), химические (прочные пленки оксидов, фосфатов) и неметаллические (лаки, краски, эмали).

Металлические защитные покрытия обладают рядом преимуществ, в том числе высокой коррозионной стойкостью, стойкостью к механическим воздействиям, привлекательным внешним видом. За счет нанесения гальванических покрытий можно увеличить твердость трущихся поверхностей (например, цилиндров двигателей внутреннего сгорания), что позволяет увеличить срок их службы.

Одним из наиболее твердых покрытий является хромовое. Также часто используют близкое по твердости к хромовому, но более дешевое никелевое покрытие. Кроме высокой твердости, превышающей твердость защитного покрытия из кадмия, цинка и олова, никелевое покрытие является одним из самых устойчивых к коррозии.

Необходимое для никелирования технологическое оборудование конструируют на основе конкретных производственных задач, решаемых тем или иным предприятием. Установка по нанесению защитных покрытий может эксплуатироваться как отдельная технологическая единица. Кроме того, оборудование может быть установлено в специализированных гальванических цехах [2, 3], что дает возможность использовать уже имеющееся оборудование и приспособления для очистки деталей, их обезжиривания, промывки, сушки и пр.

При этом следует учитывать особенности конкретного производства, в том числе размеры и планировку цеха или участка, конструкцию и расположение гальванических ванн, наличие или отсутствие требуемого вспомогательного оборудования (насосов, теплообменников, фильтровальных установок и пр.), расположение систем водоснабжения, электропитания и вентиляции.

Возможны два способа нанесения никелевых покрытий: электролитический и химический [4]. В данной статье акцент сделан на разработке конструкции установки для химического никелирования металлических изделий, функционирующей в составе гальванической линии.

Требования к технологическому оборудованию

В процессе разработки линии химического никелирования важным этапом является выбор технологического оборудования, обладающего перечисленными ниже требованиями [5 – 8].

Во время проведения процесса никелирования возможно отложение никеля на стенках ванны, поэтому необходимо предусмотреть возможность механической или химической очистки ванны от выпадающего в виде твердого осадка порошкообразного никеля. Во время проведения процесса важно соблюдение всех его технологических параметров. На качество покрытия влияют, в частности, состав, концентрация и рабочая температура электролита.

Одним из способов предотвращения осаждения никеля на стенках ванны и поверхностях трубчатых электронагревателей (**ТЭН**) является подача на них положительного потенциала (то есть анодная защита).

Изменение состава электролита (его загрязнение) ведет к браку. Для очистки электролита от загрязнений необходимо предусмотреть систему фильтрации. Поддержание химического состава электролита обеспечивается системой подачи корректирующего раствора.

Для достижения равномерной концентрации электролита, температуры и стабилизации прочих технологических параметров по всему объему ванны необходима система перемешивания раствора, например, с помощью барботажа или механизма качания/встряхивания подвеса с деталями.

Поддерживать в ванне требуемую рабочую температуру раствора возможно с использованием систем как внешнего, так и внутреннего обогрева. Для внешнего обогрева может быть использована рубашка, в которую подается жидкий теплоноситель или греющий пар, для внутреннего – возможно применение ТЭНов или змеевиков, непосредственно погружаемых в раствор. Для контроля температуры, а также уровня раствора, ванна должна быть оборудована соответствующими датчиками.

В качестве базовой установки выбрана установка серии УХН (установка химического никелирования). Установки данной серии применяются для проведения процесса химического никелирования металлических изделий сложной конфигурации, в том числе изготовленных из углеродистых и коррозионно-стойких сталей, титана, алюминия и сплавов на их основе. Процесс химического никелирования включает в себя ряд технологических операций, в том числе нагрев рабочего раствора, нанесение покрытия, корректировку рабочего раствора, удаление механических загрязнений. В установках серии УХН данные технологи-

ческие операции осуществляются в едином объеме. Такая особенность установки позволяет сократить как энергетические затраты, так и занимаемую производственную площадь. Поддержание требуемой концентрации рабочего раствора, а также величины pH, обеспечивается добавлением в процессе работы корректировочного раствора.

Общий вид стандартной установки УХН, предназначенной для эксплуатации в качестве отдельной технологической единицы, представлен на рис. 1. Предполагалось использовать данную установку химического никелирования в составе гальванической линии [9 – 11]. Однако конструкция и характеристики стандартной установки химического никелирования, предназначенной для эксплуатации как отдельной технологической единицы, не удовлетворили нужным требованиям вследствие следующих причин.

1. Конфигурация и расположение штуцеров трубопроводов, элементов управления и других ключевых элементов установки не вписывались в проектируемую гальваническую линию.

а)

Рис. 1. Общий вид стандартной установки УХН (начало):

а – вид спереди; 1 – ванна-реактор; 2 – корпус; 3, 5, 9, 13, 16 – блоки электроклапанов, электронагревателей, аккумуляторов, подготовки воздуха и датчиков уровня соответственно; 4 – бортовой отсос; 6 – столешница; 7 – пневмоцилиндры; 8, 8* – дозирующие перистальтические насосы; 10 – электрошкаф; 11, 11* – электрожгуты; 12, 12* – вспомогательные емкости; 14 – рейка для навешивания деталей; 15 – катод анодной защиты; 17 – датчик температуры; 18, 19, 20, 26 – сигнальные кнопки подачи корректировочного раствора, подачи раствора аммиака, встряхивания, нагрева соответственно; 21, 27, 29, 30 – сигнальные лампы анодной защиты, нагрева, окончания цикла и аварийная соответственно; 22 – амперметр; 23 – реле времени цикла; 24 – измеритель-регулятор температуры; 25 – сигнализатор уровня; 28 – автоматический выключатель общей сети; 31 – шланг для слива раствора; 32 – охлаждающее дно ванны-реактора; 33 – кнопки выключения реле времени; 34 – насос пневматический; 35 – воронка подвода холодной воды; 36 – каркас электрошкафа

б)

Рис. 1. Окончание:

б – вид сзади

2. Для предотвращения протекания процесса химического никелирования на твердых частицах загрязнений, осевших на дне, в стандартной установке предусмотрено охлаждение дна ванны проточной водой (рабочая температура раствора должна находиться в узком диапазоне 90...92 °С, при понижении температуры реакция не протекает). Дополнительно необходимо добавить блок фильтрации раствора.

3. Стационарные баки с корректирующим раствором и дозирующие насосы в стандартной установке расположены рядом на отдельно стоящем стенде, что не приемлемо для установки, работающей в составе гальванической линии.

4. Штанги для подвеса деталей на оригинальной установке располагались поперек ванны, однако при эксплуатации в составе гальванической линии требуется продольное расположение.

Модернизация установки для химического никелирования

Для изменения конструкционных и эксплуатационных характеристик стандартной установки химического никелирования проведена следующая модернизация:

- добавлен блок фильтрации рабочего раствора с его последующим возвратом в ванну через эжекторы. При этом система охлаждения дна ванны оставлена без изменений, и в процессе эксплуатации возможно использовать либо фильтрацию раствора, либо охлаждение. Одновременное использование и охлаждения, и фильтрации недопустимо, так как активное перемешивание, возникающее за счет работы эжекторов блока фильтрации, приведет к охлаждению раствора во всем объеме ванны, а не только в придонном слое;

- один бак с корректирующим раствором (раствор аммиачной воды для повышения уровня pH раствора) и дозирующий насос интегрированы в конструкцию ванны (они расположены непосредственно на раме установки и скрыты за панелями обшивки), так установка стала более компактной;

– кроме интегрированного стационарного бака для корректировочного раствора добавлены передвижные емкости. Суммарно в составе проектируемой гальванической линии планируется использование трех установок химического никелирования. При этом одни и те же передвижные емкости могут обслуживать их все, и отдельно стоящие баки не требуются;

– оригинальная система встряхивания подвески на четырех пневмоцилиндрах переделана на два пневмоцилиндра, что упростило конструкцию рамы подвески, а также снизило стоимость всего пневмооборудования в целом и упростило его наладку; подобраны пневмоцилиндры с требуемым усилием и рабочим ходом;

– штанга подвеса деталей переделана на продольное (относительно гальванической линии) расположение, при этом комплект для поперечного расположения штанги сохранен и при необходимости штанга может быть легко использована и в поперечном расположении;

– все трубопроводы и пневмомагистрали проложены заново и целиком скрыты в корпусе установки, при этом в обшивке есть специальные окна для быстрого доступа к пневмоцилиндрам и магистралям;

– проведен ряд механических и технологических расчетов, результаты которых представлены ниже.

Центральной несущей конструкцией установки является корпус установки, эксплуатация которого осуществляется в агрессивных условиях основной среды. Исследование титановых сплавов показали их высокую коррозионную стойкость в различных агрессивных средах, в том числе во всех электролитах щелочного, слабокислого и кислого характера [12], поэтому в качестве основного конструкционного материала корпуса ванны выбран титан технический ВТ1-00 ГОСТ 19807–91. Выполнен расчет на прочность стенок корпуса установки согласно методике, представленной в [13]. Требуемая толщина стенок корпуса составила 2 мм.

Проведен тепловой расчет ТЭН, определяющий электрическую мощность и поверхность теплообмена, необходимые как для разогрева электролита в ванне, так и для поддержания его температуры в процессе работы. Установленная мощность электронагревателей составила 20 кВт, поверхность охлаждения дна $0,45 \text{ м}^2$.

Для обеспечения удаления вредных веществ, выделяющихся с поверхности рабочего раствора, установка оборудована однобортным отсосом. Проведен расчет однобортного отсоса без передувки со целью всасывания в горизонтальной плоскости. Расход удаляемого воздуха составил $1665,46 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Тепловой расчет и расчет бортового отсоса выполнены с использованием «Программы гальванических расчетов», разработанной авторами. В результате получена установка для проведения процесса химического никелирования, обладающая следующими характеристиками:

Объем раствора, дм^3	270±5
Внутренние размеры ванны установки, мм	900×500×650
Габаритные размеры установки, мм	1280×1270×1330
Масса установки (без раствора), кг	385
Потребляемая мощность, кВт	21
Амплитуда встряхивания подвески, мм	25 ± 2
Частота встряхивания подвески, Гц	0,5 ± 0,1
Напряжение источника питания анодной защиты, В	6
Время разогрева раствора, мин	120
Рабочая температура раствора в рабочей зоне, °С	90 ± 2

Поверхность одновременно загружаемых деталей, м ²	2,0
Поверхность охлаждения дна, м ²	0,45
Количество фильтрата, м ³ /ч.....	0,6... 1,2
Степень очистки, мкм.....	10

Проектно-конструкторская документация разработана с использованием программного пакета SolidWorks. Трехмерная модель общего вида и отдельные узлы установки представлены на рис. 2, 3.

Рис. 2. Общий вид разработанной установки химического никелирования:
а – спереди; *б* – сзади (задняя крышка корпуса не отображена)

Рис. 3. 3D-вид узлов установки:
а – пневмоцилиндр механизма встряхивания подвески;
б – фрагмент блока фильтрации раствора

Заключение

В работе представлены результаты решения задачи разработки конструкции установки УХН, предназначенной для химического никелирования металлических изделий, изготовленных из коррозионностойких и углеродистых сталей, титана, алюминия, меди и сплавов на их основе. Модернизация установки выполнена с учетом вышеперечисленных требований. Усовершенствованная установка химического никелирования более компактна и удобна в обслуживании, а ее конструкция обеспечивает возможность функционирования в составе гальванической линии. Габаритные размеры одной загрузки деталей в рабочую зону не должны превышать 600×400×450 мм. Примерами таких деталей могут служить шестерни, валы, корпуса и т.п. Эксплуатация установки в условиях гальванического участка реального механического производства показала ее высокую эффективность.

Список литературы

1. Бердникова, Г. Г. Получение цинковых покрытий на стали Ст3 на ФГПУ «Опытный завод «Тамбоваппарат» / Г. Г. Бердникова, А. В. Малин, Ю. И. Ладыженская // Вестн. Тамб. ун-та. Серия: Естественные и технические науки. – 2012. – Т. 17, № 1. – С. 366 – 369.
2. Немтинов, В. А. Разработка электронной модели гальванической системы / В. А. Немтинов, А. А. Родина, Ю. В. Немтинова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 567 – 579. doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.567-579
3. Информационно-логическая модель поддержки принятия решений при проектировании гальванических линий / О. И. Аносова, М. П. Решетникова, К. В. Немтинов, В. А. Немтинов // Информатика: проблемы, методология, технологии : материалы XV Междунар. науч.-метод. конф., 12–13 февраля 2015 г., Воронеж. – Воронеж, 2015. – С. 89 – 92.
4. Повышение производительности процесса химического никелирования / В. Д. Скопинцев, А. В. Моргунов, Е. Г. Винокуров, Х. А. Невмятуллина // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2016. – Т. 24, № 3. – С. 26 – 31. doi: 10.47188/0869-5326_2016_24_3_26
5. Borisenko, A. B. Parallel Hybrid Metaheuristics Approach for Optimal Selection of Production Equipment / A. B. Borisenko, S. Gorlatch // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 228 – 235. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.228-235
6. Borisenko, A. B. Parallel MPI-Implementation of the Branch-and-Bound Algorithm for Optimal Selection of Production Equipment / A. B. Borisenko, S. Gorlatch // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 350 – 357. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.350-357
7. Механизм поднятия барабана в установке покрытия насыпью / В. А. Немтинов, М. А. Матрохин, А. В. Крылов, В. В. Храмцов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф., 16 – 18 октября 2019 г., Тамбов. – Тамбов, 2020. – С. 61 – 64.
8. Борисенко, А. Б. Параллельный алгоритм оптимального выбора аппаратурного оформления многоассортиментных производств / А. Б. Борисенко, С. В. Карпушкин // Прикладная информатика. – 2013. – Т. 3, № 45. – С. 56 – 68.
9. Проектирование гальванических линий с использованием информационных технологий / О. И. Аносова, К. В. Немтинов, А. А. Родина, В. А. Немтинов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 7-3 (18-3). – С. 310 – 313. doi: 10.12737/15190

10. Проектирование гальванических линий с использованием информационных технологий / О. И. Аносова, А. А. Родина, К. В. Немтинов, В. А. Немтинов // *Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского*. – 2015. – № 4 (58). – Р. 180 – 186. doi: 10.17277/voprosy.2015.04.pp.180-186

11. Nemtinov, V. Automation of the Early Stages of Plating Lines Design / V. Nemtinov, N. Bolshakov, Y. Nemtinova // *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*, 11 – 15 сентября 2017 г., Севастополь. – Севастополь, 2017. – Vol. 129. – Р. 01012. doi: 10.1051/mateconf/201712901012

12. Илларионов, А. Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов : учеб. пособие / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. – Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2014. – 137 с.

13. Усовершенствование конструкции установки гальванического цинкования мелких деталей черных металлов в насыпном виде / В. А. Немтинов, М. А. Матрохин, Ю. В. Немтинова, А. В. Крылов // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2020. – Т. 26, № 3. – С. 472 – 482. doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.472-482

Designing a Chemical Nickel Plating Unit Operating as Part of a Galvanic Line

A. B. Borisenko, V. V. Khramtsov, V. A. Nemtinov,
A. V. Krylov, M. A. Matrokhin

*Department of Computer Integrated Systems in Mechanical Engineering,
kafedra@mail.gaps.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: equipment modernization; equipment for galvanic line; chemical nickel plating.

Abstract: The paper presents the results of the analysis of the requirements for process equipment for chemical nickel plating of metal products, including carbon steels, titanium, aluminum and their alloys. The disadvantages of standard equipment (UKhN series installations, functioning as a separate process unit) during its operation as part of a galvanic line are listed. The results of the design development of an improved installation for chemical nickel plating of metal products with repeated use of the solution are presented. The testing of the installation under the conditions of a galvanic section of a real mechanical production has shown its high efficiency.

References

1. Berdnikova G.G., Malin A.V., Ladyzhenskaya Yu.I. [Obtaining zinc coatings on St3 steel at FGPU “Experimental plant “Tambovapparat”], *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and technical sciences], 2012, vol. 17, no. 1, pp. 366-369. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Nemtinov V.A., Rodina A.A., Nemtinova Yu.V. Development of Electronic Model for Electroplating System, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no 4, pp. 567-579, doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.567-579 (In Russ., abstract in Eng.)

3. Anosova O.I., Reshetnikova M.P., Nemtinov K.V., Nemtinov V.A. *Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii* [Informatics: problems, methodology, technologies], Proceedings of the XV International scientific and methodological conference, 12-13 February, 2015, Voronezh, 2015, pp. 89-92. (In Russ.)

4. Skopintsev V.D., Morgunov A.V., Vinokurov Ye.G., Nevmyatullina Kh.A. [Increasing the productivity of the process of chemical nickel plating], *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti* [Electroplating and surface treatment], 2016, vol. 24, no. 3, pp. 26-31, doi: 10.47188/0869-5326_2016_24_3_26 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Borisenko A.B., Gorlatch S. Parallel Hybrid Metaheuristics Approach for Optimal Selection of Production Equipment, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 228-235, doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.228-235 (In Eng., abstract in Russ.)
6. Borisenko A.B., Gorlatch S. Parallel MPI-Implementation of the Branch-and-Bound Algorithm for Optimal Selection of Production Equipment, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 350-357, doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.350-357 (In Eng., abstract in Russ.)
7. Nemtinov V.A., Matrokhin M.A., Krylov A.V., Khramtsov V.V. *Virtual'noye modelirovaniye, prototipirovaniye i promyshlennyy dizayn* [Virtual modeling, prototyping and industrial design], Proceedings of the VI International scientific practical conference, 16-18 October, 2019, Tambov, 2020, pp. 61-64. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Borisenko A.B., Karpushkin S.V. [Parallel algorithm of optimal choice of hardware design for multi-assortment production], *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics], 2013, vol. 3, no. 45, pp. 56-68. (In Russ.)
9. Anosova O.I., Nemtinov K.V., Rodina A.A., Nemtinov V.A. [Design of galvanic lines using information technologies], *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2015, vol. 3, no. 7-3 (18-3), pp. 310-313, doi: 10.12737/15190 (In Russ.)
10. Anosova O.I., Rodina A.A., Nemtinov K.V., Nemtinov V.A. Design of Plating Lines Using Information Technologies, *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2015, no. 4 (58), pp. 180-186, doi: 10.17277/voprosy.2015.04.pp.180-186 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Nemtinov V., Bolshakov N., Nemtinova Y. Automation of the Early Stages of Plating Lines Design, International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, 11-15 September, 2017, Sevastopol, 2017, vol. 129, pp. 01012, doi: 10.1051/mateconf/201712901012
12. Illarionov A.G., Popov A.A. *Tekhnologicheskiye i ekspluatatsionnyye svoystva titanovykh splavov: uchebnoye posobiye* [Technological and operational properties of titanium alloys: a tutorial], Yekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2014, 137 p. (In Russ.)
13. Nemtinov V.A., Matrokhin M.A., Nemtinova Yu.V., Krylov A.V. [Improvement of the design of the installation for galvanic zinc coating of small parts of ferrous metals in bulk], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 472-482, doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.472-482 (In Russ., abstract in Eng.)

Die Entwicklung der Konstruktion der Anlage der chemischen Vernickelung, die in der Zusammensetzung der galvanischen Linie funktioniert

Zusammenfassung: Es ist die Analyse der Anforderungen an die technologische Ausrüstung zur Durchführung des Prozesses der chemischen Vernickelung von Metallprodukten, einschließlich Kohlenstoffstählen, Titan,

Aluminium und deren Legierungen durchgeführt. Aufgelistet sind die Nachteile von Standardgeräten (ein Gerät der Serie UChN, das als separate technologische Einheit funktioniert) beim Betrieb als Teil einer galvanischen Leitung. Die Ergebnisse der Konstruktionsentwicklung der verbesserten Anlage zur chemischen Vernickelung von Metallprodukten bei wiederholtem Einsatz der Lösung sind vorgestellt. Die Erprobung der Anlage unter den Bedingungen des galvanischen Abschnitts einer realen mechanischen Fertigung zeigte ihre hohe Leistungsfähigkeit.

Conception d'une installation de nickelage chimique fonctionnant dans la ligne de galvanoplastie

Résumé: Est effectuée une analyse des exigences pour un équipement de traitement pour le processus de nickelage chimique des produits métalliques, y compris les aciers au carbone, le titane, l'aluminium et les alliages à base de ces derniers. Sont énumérés les inconvénients de l'équipement standard (installation de la série UHN, fonctionnant comme une unité technologique distincte) lors de son fonctionnement dans le cadre d'une ligne de galvanoplastie. Sont présentés les résultats de la conception d'une installation améliorée pour le nickelage chimique des produits métalliques avec l'utilisation répétée de la production. L'essai de l'installation dans les conditions de la section galvanique de la production mécanique réelle a montré son efficacité élevée.

Авторы: *Борисенко Андрей Борисович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Храмцов* – кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Немтинов Владимир Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Крылов Алексей Викторович* – магистрант; *Матрохин Михаил Александрович* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Мокрозуб Владимир Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.