

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.362:537.322

DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-2-15-22



Оригинальная статья /Original article

Термоэлектрическое устройство для крепления деталей методом примораживания при их механической обработке

О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов, С.Г. Гасанова, З.М.–З. Бадрудинова

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка конструкции термоэлектрического устройства для крепления деталей методом примораживания при их механической обработке, анализ его параметров и характеристик. **Метод.** Описана конструкция ТЭУ для крепления деталей методом примораживания при их механической обработке. В состав устройства входит сильноточная ТЭБ, выполненная на основе слоистых термоэлементов с улучшенными термомеханическими характеристиками. ТЭБ сопрягается с тепловыравнивающей керамической пластиной со стороны холодных спаев, а со стороны горячих спаев через подобную же керамическую пластину контактирует с системой теплосброса. **Результат.** Для обеспечения требуемого режима работы устройства в его составе может быть использована слоистая термоэлектрическая батарея, разработанная в НИИ «Полупроводниковые термоэлектрические приборы и устройства им. Т.А. Исмаилова», Дагестанский государственный технический университет. **Вывод.** Рабочий диапазон мощностей использованной ТЭБ находится в пределах 20-50 Вт при среднем перепаде температур между спаями 50 К, ток питания - 50-80 А при потребляемой мощности 50-160 Вт. Холодильный коэффициент изменяется в пределах от 0,1 до 0,45.

Ключевые слова: крепление деталей, механическая обработка, примораживание, термоэлектрическое устройство, термоэлектрическая батарея, смазывающе-охлаждающая жидкость, холодопроизводительность, сила электрического тока

Для цитирования: О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов, С.Г. Гасанова, З.М.–З. Бадрудинова. Термоэлектрическое устройство для крепления деталей методом примораживания при их механической обработке. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(2):15-22. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-2-15-22

Thermoelectric device for fastening parts by freezing during machining

O.V. Evdulov, D.V. Evdulov, S.G. Gasanova, Z.M.–Z. Badrudinova

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to develop the design of a thermoelectric device for fastening parts by freezing during machining, and to analyze its parameters and characteristics. **Method.** The design of a thermoelectric device for fastening parts using the freezing method during their machining is described. The device includes a high-current fuel cell, made on the basis of layered thermoelements with improved thermomechanical characteristics. The fuel cell is interfaced with a heat-equalizing ceramic plate on the side of the cold junctions, and on the side of the hot junctions, through a similar ceramic plate, it is in contact with the heat release system. **Result.** To ensure the required operating mode of the device, a layered thermoelectric battery developed at the Research Institute of Semiconductor Thermoelectric Devices and Devices can be used in its composition. T.A. Ismailov”, Daghestan State Technical University. **Conclusion.** The operating power range of the used fuel cell is in the range of 20-50 W with an

average temperature difference between the junctions of 50 K, the supply current is 50-80 A with a power consumption of 50-160 W. The refrigeration coefficient varies from 0.1 to 0.45.

Keywords: fastening of parts, mechanical processing, freezing, thermoelectric device, thermoelectric battery, lubricant and cooling liquid, cooling capacity, electric current strength

For citation: O.V. Evdulov, D.V. Evdulov, S.G. Gasanova, Z.M.–Z. Badrudinova. Thermoelectric device for fastening parts by freezing during machining. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(2):15-22. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-2-15-22

Введение. Развитие машиностроительной, станкостроительной, оптической, электронной и других отраслей промышленности на сегодняшний день достигло такого уровня, когда к точности изготовления деталей и чистоте обработки их поверхностей предъявляются крайне жесткие требования (на уровне 9-12 класса точности) [1]. Это требует разработки соответствующих станков и приспособлений к ним. Станкостроительная промышленность в качестве главной своей проблемы видит разработку высокоточных станков, а проблему разработки дополнительных приспособлений и особенно устройств для фиксации деталей при их механической обработке отодвигает на второй план, хотя точность изготовления деталей в немалой степени зависит и от способа их фиксации.

В настоящее время в промышленности для крепления деталей при их механической обработке используются способы: механического крепления, заливки различными компаундами и мастиками, заливки гипсом, приклеивания различными клеями на столах-спутниках, фиксации деталей из магнитных материалов на магнитных столах, крепления вакуумными присосками [2, 3]. Все эти методы фиксации имеют ограниченные области применения, приводят к повышению брака в производстве, повышая тем самым себестоимость изделий. Основными недостатками всех этих способов крепления, кроме первого и двух последних, являются загрязнение окружающей среды различными растворителями и моющими средствами, низкая санитария производственного процесса, низкая производительность, вредные производственные условия для рабочих, как по составу атмосферы, так и по температурному режиму в цехе [4]. В этих условиях перспективным методом крепления деталей при их механической обработке является метод примораживания [5].

Постановка задачи. Низкотемпературное воздействие на материалы обрабатываемых деталей способствует созданию качественно новых изменений в структуре материалов, а также обеспечивает заметное улучшение механических свойств при их обработке. Этот универсальный высокоточный способ базирования и фиксации деталей с использованием экологически безопасных веществ обеспечивает повышение производительности труда и точности изготовления деталей. Целью настоящей работы является рассмотрение конструкции термоэлектрического устройства (ТЭУ) для крепления деталей методом примораживания при их механической обработке, анализ его параметров и характеристик.

Методы исследования. Основной проблемой при разработке технологии крепления деталей методом примораживания является повышение плотности теплового потока, отводимого от рабочей поверхности устройства - холодильника.

В процессе механической обработки деталей на рабочую поверхность устройства крепления для охлаждения зоны резания подается смазывающе-охлаждающая жидкость (СОЖ) специального состава, которая повышает плотность теплового потока на рабочую поверхность холодильника. В итоге плотность теплового потока на рабочей поверхности охлаждающего устройства обуславливается частично количеством теплоты, выделяющимся в зоне резания деталей, количеством теплоты охлаждения СОЖ и теплопритоками из окружающей среды. Первый поток наравне с другими факторами в основном определяется скоростью подачи, глубиной резания, скоростью вращения инструмента. Данная часть потока не может варьироваться, так как это потребует изменения режимов резания обрабатываемой поверхности в производстве. Вторая часть потока может быть снижена

за счет дополнительного охлаждения СОЖ до температуры, близкой к температуре ее замерзания перед подачей в зону обработки. Дальнейшее снижение температуры СОЖ недопустимо из-за возможности закупорки системы ее циркуляции из-за перехода воды в твердое состояние - лед. Последней составляющей тепловой нагрузки на устройство крепления нельзя пренебрегать, так как она обусловлена вихревым потоком воздуха, который захватывается вращающимся с большой угловой скоростью абразивным кругом. Поэтому суммарное значение плотности теплового потока, отводимого устройством крепления, которое обеспечивает надежную фиксацию деталей методом примораживания, должно быть больше 10^5 Вт/м².

Одним из перспективных методов охлаждения рабочей поверхности устройства для крепления деталей примораживанием для их дальнейшей механической обработки является метод, основанный на использовании в качестве холодильника полупроводниковой термоэлектрической батареи (ТЭБ) [6-10]. Термоэлектрический холодильник классической П-образной конструкции термоэлементов способен обеспечить указанную плотность теплового потока на холодной стороне при высоте ветвей термоэлементов порядка $3 \cdot 10^{-3}$ м и токах питания порядка 50-100 А [11-14]. В такой конструкции ТЭБ механические напряжения достигают максимальной величины. Эти факторы приводят к снижению надежности известной конструкции ТЭБ практически до нуля. При этом использование режима реверса тока питания ТЭБ исключается, так как с переключением направления тока возникают, так называемые, тепловые, а, следовательно, и механические знакопеременные удары, полностью разрушающие ТЭБ.

Данное обстоятельство требует разработки термоэлементов и соответственно ТЭБ специальной конструкции, которая позволила бы устранить указанные недостатки. Такие конструкции ТЭБ, рассчитанные на большие токи питания с малой высотой термоэлементов, и практически полным исключением механических напряжений приведены в [15-17], в основу которых заложена слоистая конструкция термоэлементов, описанная в [18]. В ней плотность теплового потока на холодных спаях ТЭБ повышается более чем в три раза за счет уменьшения высоты термоэлементов до $1-1,5 \cdot 10^{-3}$ м и соответственно повышения величины тока питания. При этом для повышения плотности упаковки и, соответственно, увеличения холодопроизводительности единичных термоэлементов диаметр сечения их ветвей должен быть не менее 10^{-2} м.

Конструкция ТЭБ с успехом может быть использована и в режиме реверсируемого холодильника - нагревателя в устройстве для фиксации деталей при их механической обработке и снятии путем переключения полярности тока питания. При переключении полярности тока питания холодильное устройство переходит в режим теплового насоса, при этом рабочая поверхность нагревается за 15-20 с, переводя фиксирующее вещество из твердого состояния в жидкое [19]. На рис.1 приведена конструкция ТЭУ для крепления деталей методом примораживания, основанная на применении указанных ТЭБ.

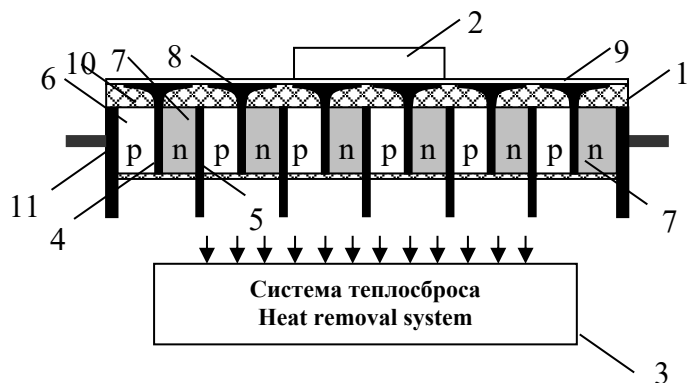


Рис. 1. Конструкция ТЭУ для крепления деталей методом примораживания
 Fig. 1. Design of thermoelectric devices for fastening parts using the freezing method

Устройство содержит ТЭБ 1, приводимую в тепловой контакт с деталью (объектом примораживания) 2 и систему теплосброса 3. ТЭБ состоит из последовательно соединенных в электрическую цепь посредством коммутационных пластин 4 и 5 чередующихся ветвей, изготовленных соответственно из полупроводника р-типа 6 и п-типа 7.

Электрическое соединение ветвей осуществляют посредством контакта ветвь р-типа – коммутационная пластина – ветвь п-типа, где ветвь р-типа контактирует торцевой поверхностью с одной из поверхностей коммутационной пластины, а ветвь п-типа – с другой. Каждая ветвь в ТЭБ контактирует противоположными торцевыми поверхностями с двумя коммутационными пластинами.

Коммутационные пластины имеют площадь, несколько большую, чем площадь поперечного сечения ветвей р- и п-типа, вследствие чего их концы выступают за поверхность структуры, образованной ветвями ТЭБ.

Концы коммутационных пластин, осуществляющих холодные контакты, выступают за одну поверхность структуры, а концы коммутационных пластин, осуществляющих горячие контакты, – за другую.

Свободные концы коммутационных пластин 4 выполнены с сечением Т-образной формы и припаяны к электроизолированным друг от друга площадкам 8 в виде пленок металлов или сплавов, нанесенных на керамическую пластину 9. Свободные концы коммутационных пластин 5 сопрягаются с системой теплосброса [20].

Технология крепления деталей примораживанием достаточно проста. На рабочую поверхность устройства наносится слой фиксирующего вещества, на который устанавливается сама деталь.

При функционировании термоэлектрического холодильника в режиме примораживания объекта через ТЭБ пропускается постоянный электрический ток такой полярности, при которой имеет место охлаждение рабочей поверхности, контактирующей с деталью. За счет интенсивного отвода теплоты происходит переход СОЖ из жидкого состояния в твердое с фиксацией детали к поверхности рабочего столика. По окончании механической обработки детали осуществляется ее снятие с поверхности столика за счет реверса тока питания ТЭБ, нагрева рабочей поверхности столика и перехода фиксирующего вещества из твердого состояния в жидкое.

Обсуждение результатов. Определены основные параметры ТЭУ, в котором предусмотрено применение разработанной в НИИ «Полупроводниковые термоэлектрические приборы и устройства им. Т.А. Исмаилова» слоистой сильноточной ТЭБ.

В приборе может быть использована термобатарея, содержащая 18 термоэлементов, основные характеристики которой приведены на рис. 2-6.

Они представляют собой зависимости холодопроизводительности ТЭБ $Q_{ТЭБ}$, холодильного коэффициента ϵ , напряжения питания $U_{ТЭБ}$ от перепада температур между спаями $\Delta T_{ТЭБ}$ для различных значений силы тока питания $I_{ТЭБ}$, зависимость напряжения на ТЭБ от величины тока питания при различных значениях перепада температур между спаями, а также зависимость холодильного коэффициента ТЭБ от тока питания.

Графики представлены при температуре горячих спаев термоэлементов, входящих в ТЭМ, равном 305 К. В соответствии с представленными данными рабочий диапазон мощностей ТЭБ находится в пределах 20-50 Вт при среднем перепаде температур между спаями 50 К, ток питания - 50-80 А при потребляемой мощности 50-160 Вт. Холодильный коэффициент изменяется в пределах от 0,1 до 0,45.

Полная погрешность базирования детали в указанном устройстве в основном складывается из погрешностей, обусловленных уходом базiruемой поверхности в направлении, перпендикулярном плоскости шлифования. Погрешность может быть сведена к нулю путем обеспечения условий равномерности температуры по всей поверхности базирования деталей путем соответствующего подбора материалов устройства по коэффициентам теплового расширения и теплопроводности.

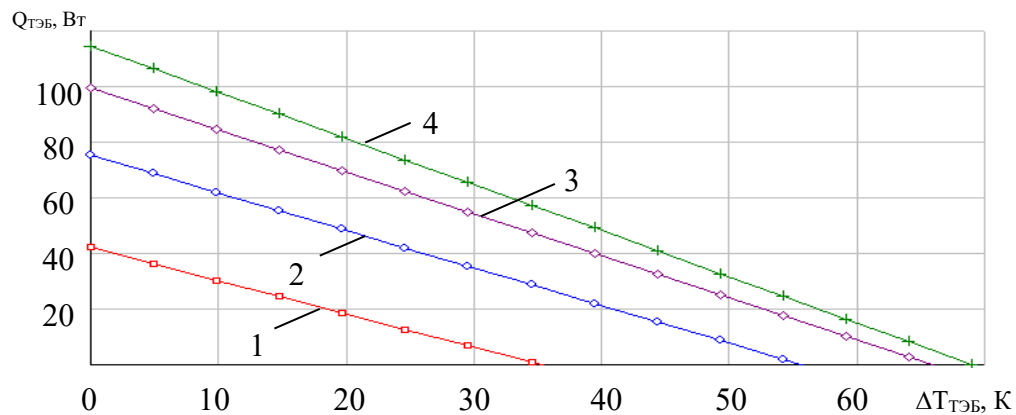


Рис. 2. Зависимость мощности ТЭБ от перепада температур между спаями при различных значениях тока питания 1- $I_{TEB}=30$ А, 2- $I_{TEB}=50$ А, 3 - $I_{TEB}=70$ А, 4 - $I_{TEB}=90$ А
 Fig. 2. Dependence of TEC power on the temperature difference between the junctions at different values of supply current 1 - $I_{TEB}=30$ А, 2 - $I_{TEB}=50$ А, 3 - $I_{TEB}=70$ А, 4 - $I_{TEB}=90$ А

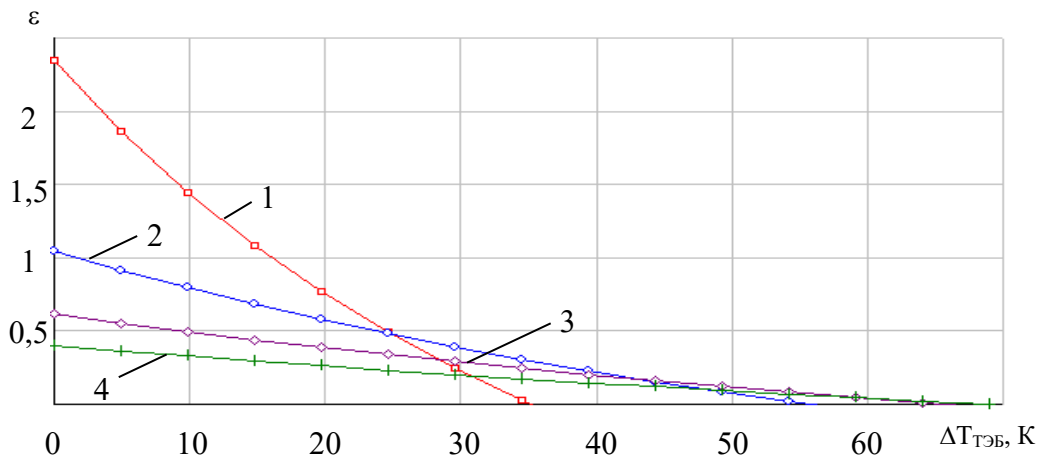


Рис. 3. Зависимость холодильного коэффициента ТЭБ от перепада температур между спаями при различных значениях тока питания 1- $I_{TEB}=30$ А, 2- $I_{TEB}=50$ А, 3 - $I_{TEB}=70$ А, 4 - $I_{TEB}=90$ А
 Fig. 3. Dependence of the thermal efficiency coefficient of the thermopile on the temperature difference between the junctions at different values of the supply current 1 - $I_{TEB}=30$ А, 2 - $I_{TEB}=50$ А, 3 - $I_{TEB}=70$ А, 4 - $I_{TEB}=90$ А

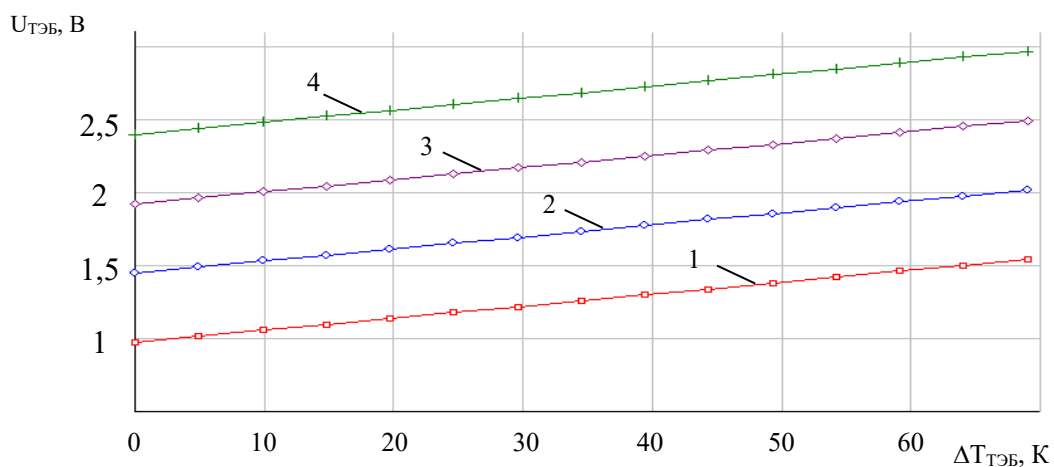


Рис. 4. Зависимость напряжения питания ТЭБ от перепада температур между спаями при различных значениях тока питания 1- $I_{TEB}=30$ А, 2- $I_{TEB}=50$ А, 3 - $I_{TEB}=70$ А, 4 - $I_{TEB}=90$ А
 Fig. 4. Dependence of the TEC supply voltage on the temperature difference between the junctions at different values of the supply current 1 - $I_{TEB}=30$ А, 2 - $I_{TEB}=50$ А, 3 - $I_{TEB}=70$ А, 4 - $I_{TEB}=90$ А

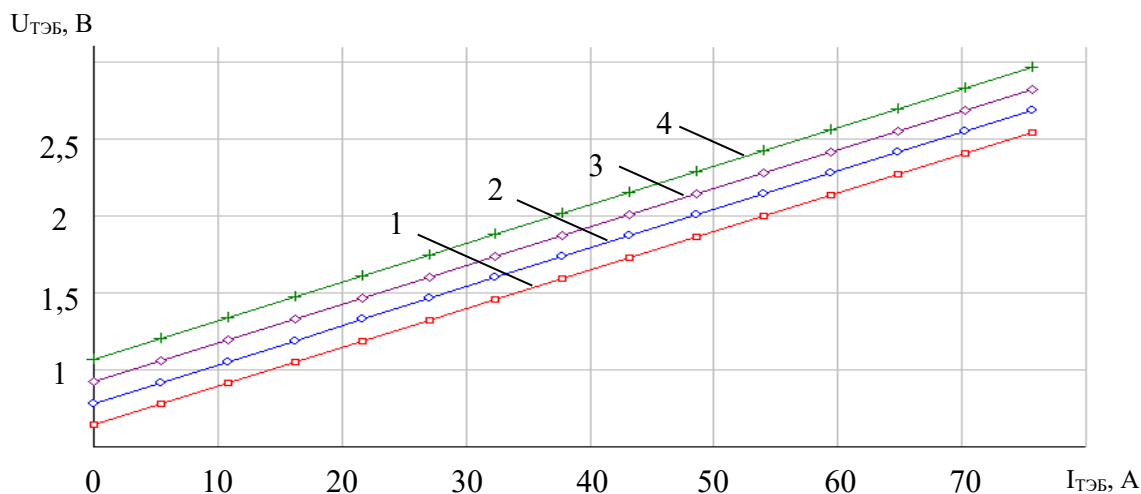


Рис. 5. Зависимость напряжения ТЭБ от величины тока питания при различных значениях перепада температур между спаями 1- $\Delta T_{\text{ТЭБ}} = 17$ К, 2- $\Delta T_{\text{ТЭБ}} = 35$ К, 3 - $\Delta T_{\text{ТЭБ}} = 52$ К, 4 - $\Delta T_{\text{ТЭБ}} = 69$ К

Fig. 5. Dependence of the TEC voltage on the supply current value at different values of the temperature difference between the junctions 1- $\Delta T_{\text{TEB}} = 17$ K, 2- $\Delta T_{\text{TEB}} = 35$ K, 3 - $\Delta T_{\text{TEB}} = 52$ K, 4 - $\Delta T_{\text{TEB}} = 69$ K

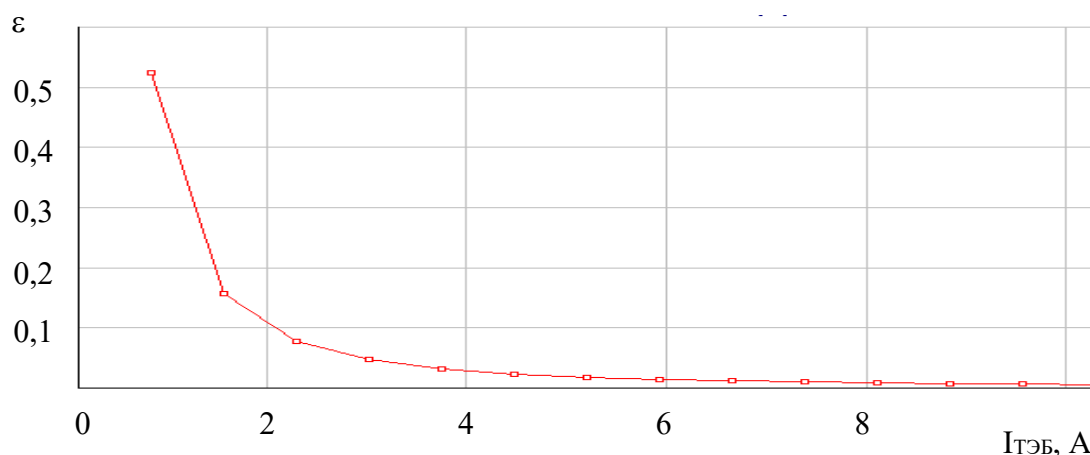


Рис. 6. Зависимость холодильного коэффициента ТЭБ от тока питания
 Fig. 6. Dependence of the thermal efficiency coefficient on the supply current

Вывод. Разработана конструкция ТЭУ для крепления деталей методом примораживания при их механической обработке. В состав устройства входит сильноточная ТЭБ, выполненная на основе слоистых термоэлементов с улучшенными термомеханическими характеристиками. ТЭБ сопрягается с тепловыравнивающей керамической пластиной со стороны холодных спаев, а со стороны горячих спаев через подобную же керамическую пластину контактирует с системой теплосброса.

Определены параметры данного ТЭУ: рабочий диапазон мощностей ТЭБ - 20-50 Вт при среднем перепаде температур между спаями 50 К, ток питания - 50-80 А при потребляемой мощности 50-160 Вт, холодильный коэффициент изменяется в пределах 0,1-0,45.

Приведенная в статье конструкция, реализующая метод примораживания деталей при их механической обработки, является надежной, экологически чистой и высокопроизводительной.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00130, <https://rscf.ru/project/23-29-00130/>.

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-00130, <https://rscf.ru/project/23-29-00130/>.

Библиографический список:

1. Аверьянов И.Н., Болотеин А.Н., Прокофьев М.А. Проектирование и расчет станочных и контрольно-измерительных приспособлений в курсовых и дипломных проектах. Рыбинск: РГТА, 2010. 220 с.
2. Гузеев В.И., Буторин Г.И., Шамин В.Ю. Теоретические основы базирования деталей и расчета размерных цепей при механической обработке. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. 82 с.
3. Галкин М.Г., Коновалова И.В., Смагин А.С. Проектирование процесса механической обработки корпусных деталей. Екатеринбург: УрГУ, 2018. 200 с.
4. Зубарев Ю.М. Расчет и проектирование приспособлений в машиностроении: СПб.: Изд.Лань, 2015, 320 с.
5. Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В. Применение полупроводниковых термоэлектрических устройств для крепления деталей методом примораживания//Холодильная техника. 2006. № 10. С. 22-24.
6. Абоуеллаиль А.А., Чан Ц., Солдатов А.И., Солдатов А.А., Костина М.А., Борталевич С.И., Солдатов Д.А. Лабораторное обоснование термоэлектрического метода контроля переходного сопротивления контактов // Дефектоскопия. 2022. № 12. С. 70-78.
7. Васильев Е.Н. Моделирование теплопередачи в устройстве подвода теплоты термоэлектрического блока охлаждения // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2023. т. 16, № 1. С. 82-91.
8. Евдулов О.В., Магомедова С.Г., Миспахов И.Ш., Набиев Н.А., Насрулаев А.М. Термоэлектрическая система для извлечения инородных объектов из тела человека // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. т. 46, № 1. С. 32-41.
9. Goldsmid H.J. Thermoelectric refrigeration, New York: Springer, 2013. 240 p.
10. Finn P.-A., Asker C., Wan K., Bilotti E., Fenwick O., Nielsen C.-B. Thermoelectric materials: current status and future challenges // Frontiers in electronic materials. 2021. Vol. 1. P.1-13.
11. Shi X.-L. J., Zou J., Chen Z.-G. Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices // Chemical reviews. 2020. Vol. 15. P.7399-515.
12. Snyder G.J., LeBlanc S., Crane D. Distributed and localized cooling with thermoelectrics, [et al.] // Future energy. 2021. Vol. 5. P. 748-51.
13. Vasil'ev E.N. The effect of thermal resistances on the coefficient of performance of a thermoelectric cooling system // Technical Physics. 2021. Vol. 66. P. 720-724.
14. Kuzichkin O.R., Vasilyev G.S., Surzhik D.I. Method for modeling dynamic modes of nonlinear control system for thermoelectric modules. Advances in Dynamical Systems and Applications. 2020. т. 15, № 2. - P. 187-197.
15. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., Вердиев М.Г. Проектирование сильноточных термоэлектрических батарей для холодильных установок средней мощности // Холодильная техника. 2009, №1.С.26-28.
16. Евдулов О.В., Евдулов Д.В. Теоретические исследования термоэлектрического элемента слоистых конструкций // Термоэлектричество. 2015. № 2. С. 62-71.
17. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В. Математическая модель холодильной установки на базе слоистых термоэлектрических батарей с тепловыми термосифонами //Ползуновский вестник. 2010. №2. С. 15-20.
18. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Магомадов Р.А.-М. Охлаждающие системы на базе сильноточных термоэлектрических полупроводниковых преобразователей. СПб.: Политехника, 2020. 285 с.
19. Исмаилов Т.А., Евдулов Д.В., Евдулов О.В. Системы отвода теплоты от элементов РЭА на базе плавающих тепловых аккумуляторов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015. № 1 (36). С. 38-44.
20. Васильев Е.Н. Расчет и оптимизация теплообменников термоэлектрического блока охлаждения // Теплофизика и аэромеханика. 2022. т. 29, № 3. С.419-430.

References:

1. Averyanov I.N., Bolotein A.N., Prokofiev M.A. Design and calculation of machine tools and instrumentation in course and diploma projects. Rybinsk: RGATA, 2010; 220. (In Russ)
2. Guzeev V.I., Butorin G.I., Shamin V.Yu. Theoretical foundations of basing parts and calculating dimensional chains during machining. Chelyabinsk: SUSU Publishing Center, 2013; 82. (In Russ)
3. Galkin M.G., Konovalova I.V., Smagin A.S. Design of the process of machining of body parts. Ekaterinburg: UrSU, 2018; 200. (In Russ)
4. Zubarev Yu.M. Calculation and design of devices in mechanical engineering: St. Petersburg: Lan Publishing House, 2015; 320. (In Russ)
5. Ismailov T.A., Verdiev M.G., Evdulov. Application of semiconductor thermoelectric devices for fastening parts using the freezing method. Refrigeration equipment. 2006;10:22-24. (In Russ)

6. Abouellail A.A., Chan Ts., Soldatov A.I., Soldatov A.A., Kostina M.A., Bortalevich S.I., Soldatov D.A. Laboratory substantiation of the thermoelectric method for monitoring the contact resistance. *Defectoscopy*. 2022.; 12:70-78.
7. Vasiliev E.N. Modeling of heat transfer in the heat supply device of a thermoelectric cooling unit. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Equipment and technology*. 2023. vol. 16, no. 1. pp. 82-91..
8. Evdulov O.V., Magomedova S.G., Mispakhov I.Sh., Nabiev N.A., Nasrulaev A.M. Thermoelectric system for removing foreign objects from the human body. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2019; 46(1):32-41 (In Russ)
9. Goldsmid H.J. Thermoelectric refrigeration, New York: Springer, 2013;. 240.
10. Finn P.-A., Asker C., Wan K., Bilotti E., Fenwick O., Nielsen C.-B. Thermoelectric materials: current status and future challenges. *Frontiers in electronic materials*. 2021; 1:1-13.
11. Shi X.-L. J., Zou J., Chen Z.-G. Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices. *Chemical reviews*. 2020; 15:7399-515.
12. Snyder G.J., LeBlanc S., Crane D. Distributed and localized cooling with thermoelectrics, [et al.] *Future en-ergy*. 2021; 5: 748-51.
13. Vasil'ev E.N. The effect of thermal resistances on the coefficient of performance of a thermoelectric cooling system. *Technical Physics*. 2021; 66: 720-724.
14. Kuzichkin O.R., Vasilyev G.S., Surzhik D.I. Method for modeling dynamic modes of nonlinear control system for thermoelectric modules. *Advances in Dynamical Systems and Applications*. 2020; 15(2):187-197.
15. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V., Verdiev M.G. Design of high-current thermoelectric batteries for medium-power refrigeration units. *Refrigeration equipment*. 2009; 1:26-28. (In Russ)
16. Evdulov O.V., Evdulov D.V. Theoretical studies of the thermoelectric element of layered structures. *Thermoelectricity*. 2015; 2: 62-71. (In Russ)
17. Isamilov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V. Mathematical model of a refrigeration unit based on layered thermoelectric batteries with thermal thermosiphons. *Polzunovskiy vestnik*. 2010; 2: 15-20. (In Russ)
18. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Magomadov R.A.-M. Cooling systems based on high-current thermo-electric semiconductor converters. St. Petersburg: Politekhnik, 2020; 285. (In Russ)
19. Ismailov T.A., Evdulov D.V., Evdulov O.V. Systems for removing heat from electronic elements based on melting heat accumulators. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2015; 36(1):38-44.
20. Vasiliev E.N. Calculation and optimization of heat exchangers of a thermoelectric cooling unit. *Thermal physics and aeromechanics*. 2022; 29(3): 419-430. (In Russ)

Сведения об авторах:

Евдулов Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; ole-ole-ole@rambler.ru

Евдулов Денис Викторович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники evdulovdenis@yandex.ru.

Гасанова Сарабика Гусеновна, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники ms.sarabike@mail.ru.

Бадрудинова Заира Магомед-Загировна, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники badrudinova.zair@yandex.ru.

Information about authors:

Oleg V. Evdulov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; ole-ole-ole@rambler.ru

Denis V. Evdulov, Cand. Sci. (Eng.), Senior lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering evdulovdenis@yandex.ru.

Sarabika G. Gasanova, Graduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering ms.sarabike@mail.ru.

Zaira M.-Z., Badrudinova, Graduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering badrudinova.zair@yandex.ru.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 02.02.2024.

Одобрена после/рецензирования Revised 27.02.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 27.02.2024.