

СЕКЦИЯ 6 КРИОГЕННАЯ И КРИОВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА

Применение монодисперсных гранул в регенеративном теплообменнике криогенной газовой машины Гиффорда-Мак-Магона

В.Б.Анкудинов, Ю.А.Марухин, В.П.Огородников, В.А.Рыжков
Московский энергетический институт (НИУ МЭИ),
Москва, Красноказарменная ул., 14. E-mail: ankudinovvb@mpei.ru

Проведено исследование возможности применения технологии получения монодисперсных гранул при диспергировании сплава редкоземельного металла ErNi. Показана эффективность применения технологии в этом случае. Опыты на двухступенчатой криогенной газовой машине Гиффорда-Мак-Магона не позволили выявить преимущество ErNi по сравнению с традиционно применяемым Er3Ni вследствие малой длины регенеративного теплообменника второй ступени.

Application of monodisperse granules in the regenerative heat exchanger of GM cryocooler. V.B.Ankudinov, Y.A.Marukhin, V.P. Ogorodnikov, V.A.Rygvov. The possibility of using the technology of monodisperse granules by dispersing the rare earth alloy ErNi is investigated. The effect of this technology is shown. The experiments on two-stage GM cryocooler have not revealed the ErNi advantage over the traditionally used Er3Ni due to the small length of the regenerative heat exchanger of the second stage.

Примерно 20 лет назад в Центре высоких технологий Московского энергетического института началась разработка технологии получения монодисперсных гранул из различных металлов и сплавов, используемых в криогенной технике в качестве насадков регенеративных теплообменников криогенных газовых машин (КГМ). Технология основана на физическом эффекте вынужденного капиллярного распада струи [1]. Созданы грануляторы и освоено производство монодисперсных гранул. Поставки монодисперсных гранул осуществляются как у нас в стране, так и за рубеж (США, Германия, Китай). До сих пор наших партнеров интересовали монодисперсные гранулы из сплавов свинца с сурьмой Pb95Sb5 и редкоземельных металлов Er3Ni и HoCu2. Однако, в исследовательских центрах ряда стран постоянно проводятся работы по совершенствованию КГМ различными способами, включая поиски альтернативных материалов насадки нижней ступени регенеративного теплообменника [2]. Вследствие этого в последнее время появился интерес к сплаву ErNi.

Целью работы является исследование возможности применения технологии монодисперсного гранулирования в случае производства гранул из сплава ErNi. Кроме того, представляет интерес проведение опытов с насадками из этого сплава на криогенной газовой машине Гиффорда-Мак-Магона.

Особенность диспергирования струи расплава ErNi связана с высокой температурой плавления сплава ErNi, которая составляет $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, что примерно на $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше по сравнению с Er3Ni и HoCu2 (рис.1). Вследствие этого при истечении струи усиливается эффект смачивания расплавом ErNi поверхности фильеры в области выходного отверстия. Расплав растекается по торцу фильеры и даже может подниматься по ее внешней поверхности вверх на несколько мм (рис.2, средняя фильера). При этом в начальной зоне струи происходит сильное искажение ее цилиндрической формы. Это негативно влияет на характеристики вынужденного капиллярного распада струи. Распад струи становится полидисперсным и получить монодисперсные гранулы в этих условиях невозможно. Улучшить ситуацию можно путем нанесения на поверхность фильеры пленок, уменьшающих смачивание фильеры [3].

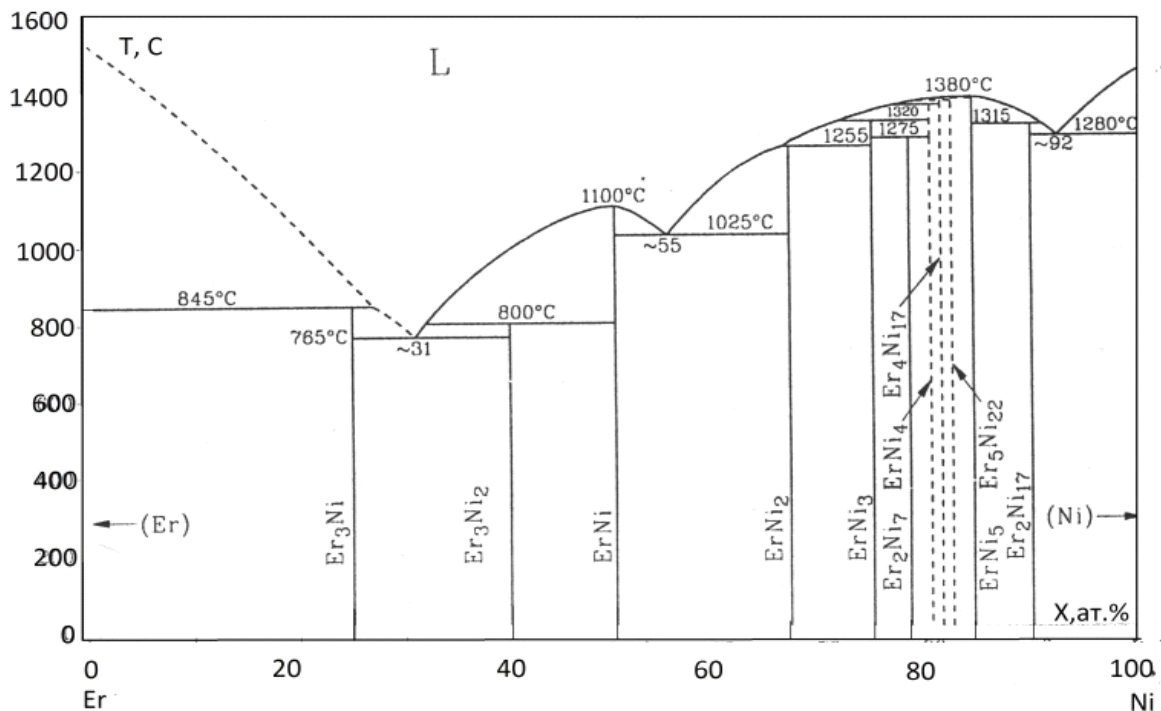


Рис. 1. Диаграмма состояния Er –Ni .



Рис.2. Фотография фильер: слева – до диспергирования, посредине – эта же фильера после диспергирования ErNi, справа – фильера с модифицированной поверхностью после диспергирования ErNi .

Такая модификация поверхности фильеры позволила использовать хорошо отработанную технологию монодисперсного гранулирования и для случая ErNi (рис.2, правая фильера). Выход годных гранул при этом составляет более 90%. Отклонение диаметра гранул от среднего значения не превышает 5%.

После получения первых опытных образцов монодисперсных гранул ErNi была предпринята попытка исследования эффективности их применения в КГМ. Опыты проводились на экспериментальном стенде, описание которого приведено в [4]. Основой стенда являлась двухступенчатая криогенная газовая машина Гиффорда-Мак-Магона. Для измерения температуры второй ступени КГМ использовались индивидуально отградуированные термпары из меди и легированной железом меди.

Вытеснитель первой ступени не изменялся при проведении опытов и был заполнен латунной сеткой. При заполнении вытеснителя второй ступени использовались монодисперсные гранулы из сплава свинца и сурьмы Pb95Sb5 диаметром $d = 280$ мкм, из ErNi($d = 210$ мкм) и Er3Ni($d = 210$ мкм). Зависимость теплоемкости этих материалов от температуры приведена на рис.(3). Исследованные варианты заполнения вытеснителя второй ступени показаны в таблице 1.

Таблица 1. Варианты заполнения вытеснителя

№	1	2	3	4
Материал гранул	Pb95Sb5 d = 280 мкм масса гранул - 259 гр	Pb95Sb5 d = 280 мкм масса гранул - 192 гр ErNi d = 210 мкм масса гранул - 59 гр	Pb95Sb5 d = 280 мкм масса гранул - 223гр ErNi d = 210 мкм масса гранул - 27гр	Pb95Sb5 d = 280 мкм масса гранул - 223гр Er3Ni d = 210 мкм масса гранул - 27гр

Полученные результаты показаны на рис.4, где приведены опытные данные по зависимости холодопроизводительности 2-й ступени от температуры для разных вариантов заполнения вытеснителя.

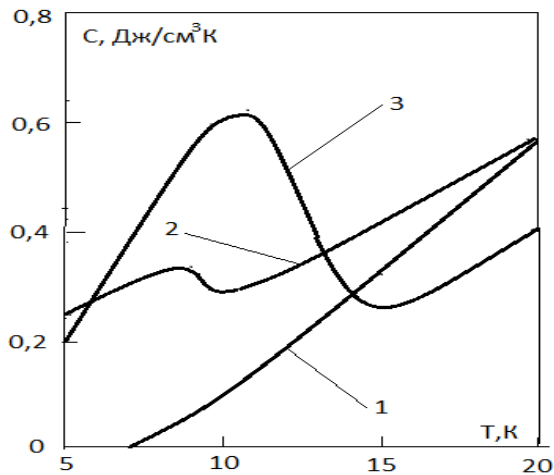


Рис.3. Зависимость теплоемкости материалов от температуры. 1 - Pb95Sb5, 2- Er3Ni, 3 –ErNi.

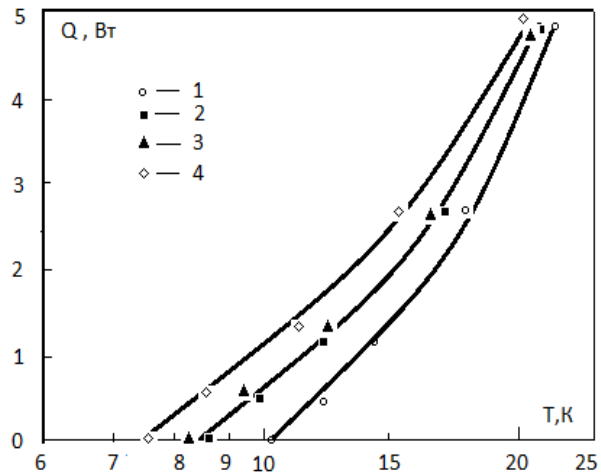


Рис.4. Зависимость холодопроизводительности 2-й ступени от температуры для разных вариантов заполнения вытеснителя. Обозначения на рисунке соответствуют таблице 1.

Рассмотрим опытные данные в случае отсутствия тепловой нагрузки второй ступени КГМ. При заполнении вытеснителя только гранулами Pb95Sb5 (вытеснитель №1) наблюдалась самая высокая температура второй ступени (T=10,1 К). В случае заполнения нижней части вытеснителя гранулами из ErNi (№2 и №3) температура понижается примерно на 1,5 К. При этом температура слабо зависит от массы гранул ErNi. Уменьшение массы гранул примерно в два раза приводит к изменению температуры лишь на 0,5 К. При заполнении нижней части вытеснителя гранулами из Er3Ni температура второй ступени КГМ понижается еще больше и достигает значения T=7,6 К. Объяснить полученные результаты можно при рассмотрении зависимости теплоемкости исследованных материалов от температуры. Теплоемкость ErNi в области температур ниже T= 10К имеет высокий уровень. С ростом температуры она резко падает и становится меньше, чем у Er3Ni и Pb95Sb5. Поэтому для того, чтобы реализовать преимущество ErNi по сравнению с Er3Ni нужно увеличить предварительное охлаждение теплоносителя в верхней части теплообменника, заполненной гранулами Pb95Sb5, что можно достичь увеличением длины вытеснителя второй ступени КГМ.

В результате работы была показана применимость технологии монодисперсного гранулирования для получения монодисперсных гранул из сплава редкоземельного металла ErNi. Опыты на двухступенчатой криогенной газовой машине Гиффорда-Мак-Магона не

позволили выявить преимущество ErNi по сравнению с традиционно применяемым Er3Ni вследствие малой длины регенеративного теплообменника второй ступени.

Литература

1. Способ получения монодисперсных сферических гранул. В.Б. Анкудинов, Ю.А. Марухин, В.П. Огородников. Патент РФ 2174060, 2001.
2. Методы повышения эффективности регенераторов второй ступени криокулера Гиффорда-Макмагона. М.В. Калужный, Наука и образование, № 11, 2012, с.55-66.
3. Способ получения монодисперсных сферических гранул. В.Б. Анкудинов, Ю.А. Марухин, В.П. Огородников. Патент РФ 2015117107, 2016.
4. Влияние теплофизических свойств материала насадки регенеративного теплообменника на характеристики работы криогенной газовой машины Гиффорда-Мак-Магона В.Б.Анкудинов, Ю.А.Марухин, В.П.Огородников, В.А.Рыжков. Материалы 9-й Международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология». Москва, КВЦ «Сокольники» 2014, 15-17 апреля, с. 304-307, ООО «Издательство Новелла».

Оценка максимальной разности температур создаваемой вакуумным туннельным диодом (ВТД) в режиме охлаждения

*С.Б. Нестеров, А.И. Холопкин, Р.О. Кондратенко
Москва ОАО «НИИВТ им. С.А. Векшинского», Нагорный проезд, 7
E-mail: holopkinai@mail.ru*

В работе проведена теоретическая оценка максимальной разности температур создаваемой вакуумными туннельными диодами (ВТД) в режиме охлаждения. Показано, что максимальная разность температур может достигать 210 К. Эта величина больше чем в 2,5 раза превышает максимальную разность температур создаваемой термоэлектрическими охлаждающими приборами. Результаты вычислений показывают перспективность использования ВТД в системах охлаждения для микроэлектроники, медицины и техники.

***Estimation of Maximal Temperature Difference Created by Vacuum Tunnel Diodes (VTD) in Cooling Mode of Operation. S.B. Nesterov, A.I. Holopkin, R.O. Kondratenko.** The paper presents a theoretical evaluation of the maximal temperature difference created by tunnel diodes (VTDs) in the cooling mode of operation. It was shown that the maximal temperature difference could reach value of 210 K. This value is more than by 2.5 times higher than the maximal temperature difference created thermoelectric cooling devices. The results of calculation shows the prospects of using VTDs in cooling systems for microelectronics, medicine and technology.*

В настоящее время в холодильной технике используются в основном холодильные установки компрессорного типа и термоэлектрические преобразователи энергии.

Основными характеристиками охлаждающих приборов являются: максимальная холодильная мощность, максимальный перепад температур и холодильный коэффициент равный отношению холодильной мощности к потребляемой электрической мощности.

Холодильные установки компрессорного типа характеризуются высокими величинами удельной холодильной мощности, высокими значениями перепада температур до 150 К и высокими значениями холодильного коэффициента в диапазоне 3-4 [1]. Недостатками таких установок являются наличие движущихся механических частей и хладагентов, повышенные значения вибраций и шума, сравнительно низкая надежность и высокая удельная стоимость.

Термоэлектрические охлаждающие приборы являются твердотельными приборами свободными от выше перечисленных недостатков холодильных установок компрессорного