DOI: *10.25515/PMI.2017.5.569*

УДК 537.811; 536.421.1; 669.2

ПОЛУЧЕНИЕ ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПЕНОАЛЮМИНИЯ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

И.И.РАСТВОРОВА
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Исследуется электромагнитная технология производства сверхлегких панелей из материалов на основе пеноалюминия. Рассматривается теория взаимодействия электромагнитного поля с веществом в твердожидком состоянии и формирование соответствующего распределения его в пространстве и во времени для реализации новых технологий и оборудования.

Предлагаемая технология производства сверхлегких панелей из материалов на основе пеноалюминия состоит из следующих основных этапов: загрузка порошкообразного сырья; приготовление шихты и формирование контейнера; компактирование (консолидация) горячей прокаткой; вспенивание заготовки – прекурсора; получение товарного изделия. Наиболее сложную задачу представляет процесс нагрева прекурсора до температуры вспенивания. В ходе исследования рассматривалось два возможных режима нагрева загрузки – статический и периодический с возвратно-поступательным движением.

Представлены требования по обеспечению температурного поля заготовок для получения пеноалюминия. Определяющий фактор в выборе режима нагрева – критерий качества нагрева заготовки. Основными параметрами, обеспечивающими требуемое температурное поле, являются выбор режима нагрева загрузки; скорость перемещения заготовки, выбор частоты. Амплитуда перемещения при возвратно-поступательном движении выбиралась исходя из имеющегося теоретического и практического опыта нагрева в данном режиме. На выбор частоты оказывали влияние несколько параметров, таких как КПД, напряжение и ток индуктора, реактивная мощность.

Проведенная оптимизация процесса электромагнитной обработки плоских изделий на основе пеноалюминия по результатам численного моделирования позволяет разработать электромагнитную систему воздействия на металлы в твердожидком состоянии.

***Ключевые слова*:** технология получения пеноалюминия, электромагнитное поле, электромагнитная обработка материалов, индукционный нагрев, твердожидкое состояние металла

***Как цитировать эту статью*:** Растворова И.И. Получение плоских деталей из пеноалюминия в переменном электромагнитном поле // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 569-575. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.569

Введение. Благодаря комплексу уникальных физико-механических, а также химических свойств алюминиевые сплавы находят все более широкое распространение в современной технике [4, 5, 9]. Сегодня использование алюминиевых сплавов в авиакосмической, судостроительной, химической и других отраслях промышленности можно считать традиционным, но сфера и условия их применения постоянно расширяются (например, изделия криогенного назначения, гидро- и электрометаллургия, энергетика и т.д.). В связи с повышением требований к качеству, надежности и безопасности техники возрастают также требования к материалам, применяемым при ее производстве [2, 3]. Для обеспечения требуемых физико-механических свойств материалов из алюминиевых сплавов предъявляются определенные требования к обработке таких изделий, в том числе и к термообработке [1, 5, 12].

В работе исследуются электромагнитная технология производства сверхлегких панелей из материалов на основе пеноалюминия. Производственная линия позволяет получать на первой стадии скомпактированное промежуточное изделие (прекурсор) толщиной от 2,5 до 15 мм с толщиной плакировки от 0,5 до 5 мм (рис.1, *а*). Горизонтальные размеры прекурсора составляют: ширина × длина – до 900 × 2200 мм.

Панель (сэндвич) из материалов на основе пеноалюминия (рис.1, *б*) имеет следующие размеры: ширина × длина – до 900 × 2200 мм, толщина 6-30 мм с плакирующими слоями из алюминия или титана толщиной от 0,5 до 5 мм (обычно 1 мм). Плотность пеноалюминиевого слоя 300-1000 кг/м^3, пена с закрытыми порами средним размером 0,8-4 мм.

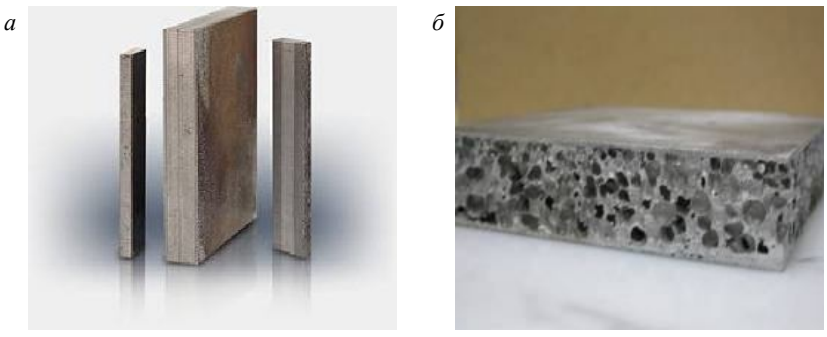


Рис.1. Прекурсоры различной толщины (*а*) и композиционная панель (*б*)

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.569

Прекурсор представляет собой плакированный металлическими листами алюминия или титана толщиной обычно от 1 до 5 мм спрессованный порошок алюминиевого сплава с 1 % вспенивающего материала. Плотность прекурсора составляет не менее 97 % от компактного металла (алюминиевого сплава). Таким образом, свойства прекурсора практически похожи на свойства компактного алюминиевого сплава, из которого он сделан. Прекурсор обладает специфическими эффектами, возникающими за счет наличия плакирующих поверхностных слоев (титан, алюминий). Все свойства пенометаллического слоя напрямую зависят от его плотности, которая может составлять от 300 до 1000 кг/м^3.

Предлагаемая для разработки в проекте технология производства сверхлегких панелей из материалов на основе пеноалюминия состоит из следующих основных этапов: загрузка порошкообразного сырья; приготовление шихты и формирование контейнера; компактирование (консолидация) горячей прокаткой; вспенивание заготовки-прекурсора; получение товарного изделия.

Сырье включает порошки различных алюминиевых сплавов, гидрид титана, а также алюминиевый и титановый прокат [5]. В производственном процессе порошки алюминиевых сплавов [8] после смешения с малым количеством вспенивающего материала (гидрида титана) засыпаются в плоский стальной или алюминиевый контейнер, обеспечивающий формирование заданных геометрических размеров прекурсора и конечной панели-сэндвича. Процесс смешения необходимо учитывать при проектировании индукционной печи, применяемой для нагрева в периодическом или непрерывном режиме контейнера с порошком алюминиевых сплавов до 400-550 °С для последующей горячей прокатки и получения скомпактированного промежуточного плоского изделия (прекурсора).

Контейнер для засыпки порошка изготовлен из стального или алюминиевого проката и имеет горизонтальные размеры, соответствующие размерам прекурсора. С учетом закрываемых краев ширина контейнера превышает ширину прекурсора ориентировочно на 4-5 см. Толщина металлического проката, из которого выполнен контейнер, составляет 1 мм. Готовый контейнер подается на загрузочное устройство.

Загрузка контейнера порошковой смесью происходит с дозированием и весоизмерением. Порошковая смесь подается в загрузочное устройство, где в контейнер также добавляются плакировочные слои из алюминиевого или титанового листа. После загрузки смесь предварительно уплотняется.

Печь рассчитывается для нагрева контейнера до 400-550 °С [10]. Конвейер печи перемещается со скоростью прокатного стана (порядка 10 см/с). После выхода из печи контейнер сразу направляется в прокатный стан для горячего компактирования. В зависимости от компоновки возможен промежуточный обогрев для поддержания температуры контейнера на пути подачи в прокатный стан.

Как только контейнер нагревается до заданной температуры, его подвергают прокатке. Прокатный стан уплотняет (компактирует) контейнер и его содержимое с заданной толщиной прокатки, соответствующей толщине прекурсора. Прокатный стан работает при скорости порядка 10 см/с с возможностью регулирования. Компактирование дает возможность получить материал прекурсора с плотностью не менее 97 % от плотности металла. На выходе из прокатного стана температура контейнера находится в интервале 350-400 °С.

После прокатки контейнер с находящимся внутри прекурсором подается на обрезку или предварительное охлаждение. Контейнер охлаждается до температуры, пригодной для обращения с ним работников. Контейнер и прекурсор обрезаются по краю по всему периметру. Размер обрезки может меняться в зависимости от способа закрытия контейнера перед его компактированием. После обрезки контейнер и прекурсор разделяются. Прекурсор помещается в закрытую керамическую форму и направляется в печь для вспенивания.

Вспенивание достигается за счет разложения гидрида титана с выделением газообразного водорода. Процесс вспенивания проходит при 700-750 °С с изменением вертикального размера прекурсора в 3-5 раз. Продолжительность операции зависит от размера панели и мощности печи. Во время вспенивания прекурсор упаковывают в закрытую керамическую форму, чтобы обеспечить сохранение геометрических размеров. При вспенивании необходимо иметь сверху и снизу ограничение, формирующее ровную поверхность.

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.569

Методы исследования. Исследования проводились с помощью компьютерного моделирования методами математической физики и вычислительной математики. В качестве основного метода исследований индукционных систем был принят численный метод с разработкой и моделированием разнообразных систем на ЭВМ. В частности, моделирование проводилось в программной среде UNIVERSAL [6] расчетом пространственно-трехмерных температурных и электромагнитных полей [7].

Требования по обеспечению температурного поля заготовок. Современное металлургическое машиностроение – обширная и многоплановая отрасль промышленности, характерной особенностью которой является огромное разнообразие машин и механизмов, различных по конструкции, видам эксплуатационных нагрузок, рабочим средам, температурным условиям работы и т.д. В соответствии с этим круг металлических материалов, применяемых в машиностроении, весьма широк: конструкционные, нержавеющие, кислотостойкие, жаропрочные стали, стали для криогенных температур и с особыми физическими свойствами, сплавы на медной, алюминиевой, никелевой, титановой и других основах. Однако высокие темпы развития современной техники в различных отраслях деятельности предъявляют все большие требования к разработке и освоению новых металлов, сочетающих свойства разных металлических материалов [13, 14, 17, 18].

Основными требованиями, предъявляемыми к качеству нагрева крупногабаритных плоских изделий на основе алюминиевых сплавов, являются: формирование предельно равномерного температурного поля по длине и сечению заготовки, минимизация времени нагрева.

Первое требование продиктовано особенностью технологического процесса производства пеноалюминия. Необходимо обеспечить по всему объему заготовки нагрев до строго определенной температуры с погрешностью примерно 20-40 °С. Недогрев не позволяет сплаву достигнуть необходимой пластичности для образования пористой структуры за счет выделяющегося при нагреве газа, перегрев же приводит к полному расплавлению всей заготовки. Второе требование связано с тем, что с увеличением продолжительности нагрева значительно снижается плотность материала заготовки, что приводит к снижению ее физико-механических свойств.

При выборе наилучшего способа нагрева изделий на основе алюминиевых сплавов до заданной температуры необходимо тщательно рассмотреть особенности всех возможных режимов нагрева.

Оптимизация процесса электромагнитной обработки. Процесс нагрева прекурсора до температуры вспенивания представляет собой наиболее сложную задачу [11, 15, 19], поэтому для выбора параметров индукционного нагревателя будем преимущественно руководствоваться данными, полученными в ходе моделирования процесса нагрева прекурсора до температуры вспенивания [6].

В ходе исследования анализировались два возможных режима нагрева загрузки – статический и периодический с возвратно-поступательным движением. Непрерывный режим не рассматривался в связи с тем, что необходимо одновременно по всей длине нагреть загрузку до заданных значений температуры.

У каждого метода есть свои преимущества и недостатки. Так, статический режим имеет более высокий КПД и, как следствие, меньшее время нагрева, но ему присущ очень существенный недостаток – некачественный нагрев торцов заготовки. Зона с температурой, выходящей за рамки требуемой, может составлять почти треть длины загрузки (рис.2), что делает данный метод крайне невыгодным для использования в производстве. Также следует отметить, что для хорошей равномерности температурного поля в центральной части загрузки требуется расположение индукторов вплотную друг к другу, что усложняет процесс загрузки и выгрузки заготовки.

Нагрев в периодическом режиме с возвратно-поступательным движением уступает стационарному режиму по КПД и времени нагрева, но позволяет в несколько раз уменьшить зону некачественного нагрева на торцах загрузки (рис.3). Кроме того, при том же уровне неравномерности температуры центральной части загрузки можно располагать индукторы на некотором расстоянии друг от друга, что облегчает процесс создания системы загрузки и выгрузки заготовки.

Таким образом, определяющим фактором в выборе режима нагрева стал критерий качества нагрева заготовки, т.е. наилучшая равномерность температуры по длине заготовки. Исследования показывают, что для нагрева заготовок предпочтителен периодический режим нагрева с возвратно-поступательным движением [17].

DOI: *10.25515/PMI.2017.5.569*

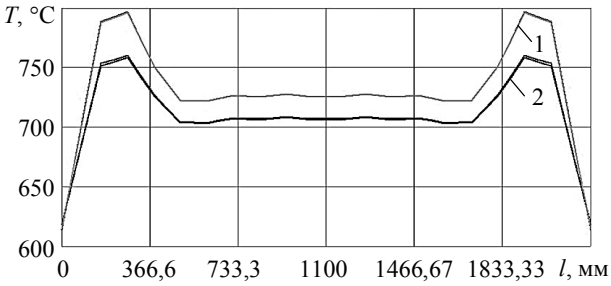


Рис.2. Распределение температуры по длине прекурсора при статическом режиме нагрева

1 – температура поверхности заготовки; 2 – температура центра заготовки

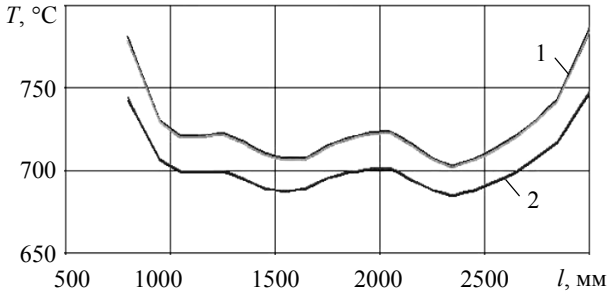


Рис.3. Распределение температуры по длине прекурсора при периодическом режиме нагрева

1 – температура поверхности заготовки; 2 – температура центра заготовки

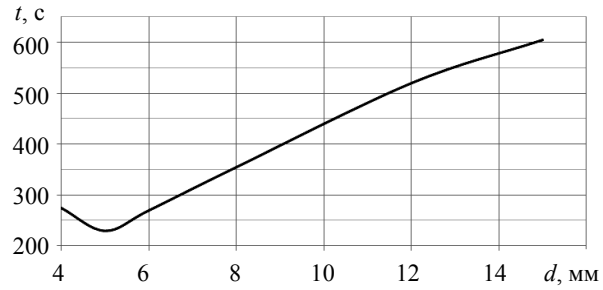


Рис.4. Зависимость времени нагрева до температуры вспенивания от толщины прекурсора

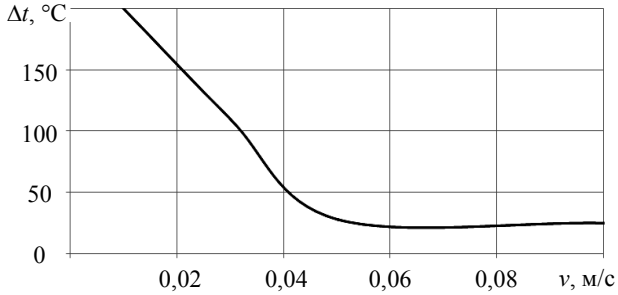


Рис.5. Зависимость температурного перепада по длине прекурсора толщиной 5 мм от скорости его перемещения

Далее определялась зависимость времени нагрева от толщины прекурсора (рис.4). Видно, что при заданной мощности 400 кВт обеспечить быстрый нагрев прекурсора можно только при его толщине от 4 до 7 мм. Более толстые загрузки не успевают прогреться, а более тонкие – становятся прозрачными для электромагнитного поля и не догреваются до требуемой температуры.

Амплитуда перемещения при возвратно-поступательном движении выбиралась исходя из имеющегося теоретического и практического опыта нагрева в данном режиме [16]. Установлено, что амплитуда перемещения должна быть кратна сумме длины индуктора и ширины зазора между индукторами, в нашем случает это 750 мм.

На выбор частоты оказывали влияние несколько параметров, таких как КПД, напряжение и ток индуктора, реактивная мощность. Оптимальным является вариант использования частоты 8-10 кГц, он позволяет получить приемлемые для изготовления установки значения тока и напряжения на индукторе. При более низких значениях частоты снижается КПД установки и возрастанет ток индуктора. При частотах 30-100 кГц значительно увеличивается напряжение на индукторе, уменьшается $\cos\varphi$ и незначительно снижается ток индуктора.

Скорость перемещения заготовки напрямую влияет на температурный перепад по длине загрузки. При малых скоростях неравномерность нагрева весьма велика. Так, при скорости 0,03 м/с она составляет 100-120 °С, при увеличении скорости неравномерность уменьшается: при 0,05 м/с она равна 22-28 °С. При дальнейшем увеличении скорости уже не происходит значительных изменений в температурном перепаде по длине заготовки. Также следует учитывать, что увеличение скорости может привести к проскальзыванию заготовки в момент изменения направления ее движения, поэтому необходимо выбирать по возможности меньшую скорость (рис.5).

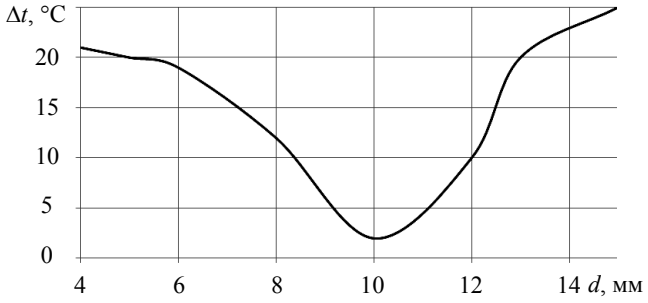


Рис.6. График температурного перепада по ширине в зависимости от толщины прекурсора

Как было сказано, наблюдается неравномерный нагрев заготовки (см. рис.3). При этом можно выделить несколько типов неравномер-

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.569

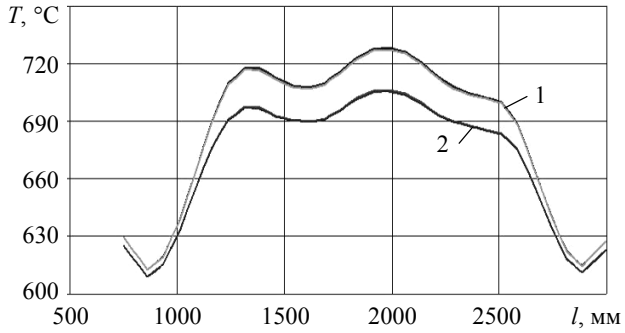


Рис.7. Распределение температуры по длине прекурсора при увеличении количества витков на крайних индукторах

1 – температура поверхности заготовки; 2 – температура центра заготовки

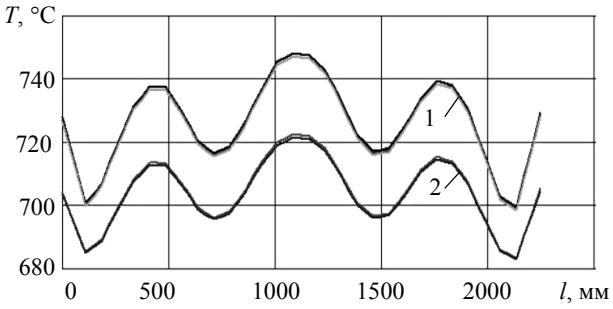


Рис.8. Распределение температуры по длине прекурсора при увеличении высоты витков на крайних индукторах

1 – температура поверхности заготовки; 2 – температура центра заготовки

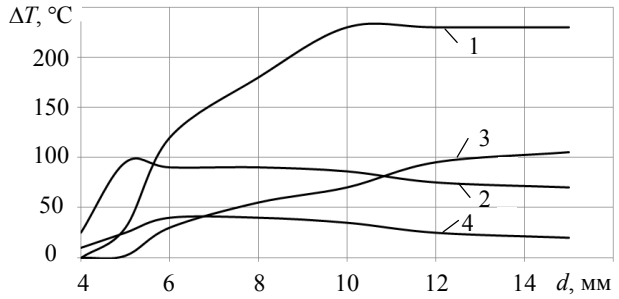


Рис.9. График зависимости максимального температурного отклонения от толщины прекурсора

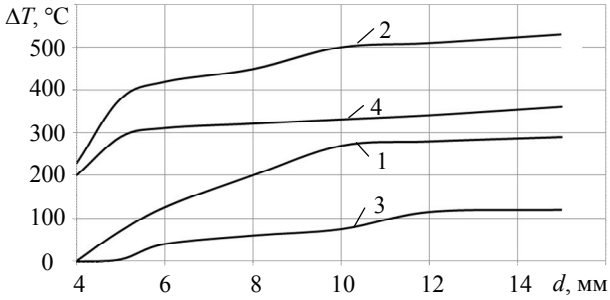


Рис.10. График зависимости длины торцевой зоны с температурным отклонением от толщины прекурсора

ного нагрева, в результате чего возникают температурные перепады: по длине в регулярной части заготовки, по ширине, на торцах.

В центральной части заготовки температурный градиент можно регулировать путем изменения скорости движения заготовки. Как видно из рис.3, по ширине заготовки температурный перепад повторяет профиль температурного перепада по длине в регулярной части заготовки и зависит от толщины нагреваемой заготовки (рис.6). При этом при толщине заготовки меньше 10 мм наблюдается недогрев боковых кромок заготовки, а при большей толщине – перегрев.

Температурный перепад на торцах заготовки является следствием краевого эффекта при индукционном нагреве. Этот температурный перепад имеет наибольшее значение и выходит за рамки допустимого температурного диапазона. Для регулирования температурного перепада требуется изменение мощности на крайних индукторах. Поэтому все восемь индукторов подключены параллельно к одному источнику. Изменение выделяемой на индукторе мощности возможно за счет изменения количества витков.

Далее рассмотрим распределение температуры по длине загрузки в случае, когда крайние индукторы имеют на один виток больше (рис.7) и когда крайние индукторы имеют бóльшую высоту: 95 и 100 мм, т.е. на них выделяется меньшая мощность (рис.8).

На графиках рис.9 и 10 показаны зависимости максимального отклонения температуры от заданного диапазона и длины торцевой зоны с этим отклонением температуры от толщины прекурсора для случаев, когда количество витков всех индукторов одинаково (кривая 1), когда крайние индукторы имеют шесть витков (кривая 2) и когда крайние индукторы имеют высоту 95 мм (кривая 3) и 100 мм (кривая 4).

Как видно из графиков 9, 10, в нашем случае регулирование качества нагрева при помощи изменения количества витков является весьма грубым из-за малого числа витков. Изменение высоты крайних индукторов дает гораздо более точное регулирование, что позволяет снизить как отклонение температуры от заданного диапазона, так и ширину торцевой зоны с температурным отклонением, но все же не может обеспечить на всем сортаменте заготовок требуемое качество

нагрева. В случае одинакового числа витков индукторов и когда крайние индукторы имеют бóльшую высоту, происходит перегрев торцевой зоны, а когда крайние индукторы имеют на один виток больше – торцевая зона недогревается.

Источник питания имеет собственную замкнутую двухконтурную систему охлаждения, поэтому необходимо отдельно охлаждать только индукторы и конденсаторную батарею. Из результатов численного моделирования было получено, что суммарно на индукторах рассеивается мощность 185-200 кВт. При данной мощности для теплоотведения необходим расход охлаждающей воды не менее 5,4 $м^3$/ч. Согласно техническим характеристикам конденсаторов, для охлаждения конденсаторной батареи минимальный расход охлаждающей воды должен составлять не менее 3,6 $м^3$/ч. Расход воды на охлаждение шинопроводов 2 $м^3$/ч. Итого станция охлаждения должна обеспечивать расход охлаждающей воды не менее 11 $м^3$/ч.

На основе проведенных исследований разработано индукционное оборудование для высокотемпературной электромагнитной обработки крупногабаритных плоских изделий на основе алюминиевых сплавов в индукционной печи.

Выводы

1. Исследованы электромагнитные системы воздействия на металлы в твердожидком состоянии. Проведен анализ результатов численного моделирования с последующей оптимизаций технологического процесса и параметров индукционного нагревателя

2. Разработано индукционное оборудование для высокотемпературной электромагнитной обработки крупногабаритных плоских изделий на основе алюминиевых сплавов в индукционной печи.

3. Разработана технология получения индукционным способом крупногабаритных изделий из пеноалюминия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авторадиография поверхностей раздела и структурная стабильность сплавов / С.З.Бокштейн, С.С.Гинзбург, С.Т.Кишкин, И.М.Разумовский, Г.Б.Строганов. М.: Металлургия. 1987. 272 с.

2. *Белов А.Ф.* Новые металлургические процессы – путь к повышению качества и эффективности использования металлов // Известия АН СССР. Металлы. 1981. № 3. С. 4-9.

3. *Береснев А.Г.* Проблемы и перспективы применения металлургии гранул для ракетно-космической техники / А.Г.Береснев, А.И.Логачева, А.В.Логунов // Двигатель. 2008. № 2 (56). С. 8-10.

4. *Гарибов Г.С.* Потенциал металлургии гранул / Г.Гарибов, Ю.Елисеев, Э.Гольдинский // Национальная металлургия. 2001. № 1. С. 34-36.

5. *Гарибов Г.С.* Металлургия гранул – основа создания перспективных авиационных двигателей // Технология легких сплавов. 2007. № 1. С. 66-78.

6. *Демидович В.Б.* Компьютерное моделирование устройств индукционного нагрева / В.Б.Демидович, Ф.В.Чмиленко. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 160 с.

7. *Немков В.С.* Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С.Немков, В.Б.Демидович. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.

8. Обработка легких и специальных сплавов / Ю.И.Пономарев, Н.В.Кистэ, А.С.Кляцкин, Н.А.Мельников. М.: ВИЛС, 1996. 419 с.

9. Перспективы производства авиационно-космических материалов и процессы их обработки в начале XXI века / Г.С.Гарибов, Р.Н.Сизова, Ю.А.Ножницкий, Л.С.Богуславский // Технология легких сплавов. 2002. № 4. С. 106-117.

10. *Портная З.Н.* Теплое компактирование порошковых материалов // Технология металлов. 2003. № 3. С. 44-45.

11. *Растворова И.И.* Использование индукционного нагрева в технологии производства металлических изделий методом тиксоформовки // Энергоэффективные электротехнологии: Сб. трудов. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. С. 55-57.

12. Энергосберегающие технологии прецизионного нагрева легких сплавов в индукторах / В.Б.Демидович, Е.А.Григорьев, В.А.Оленин и др. // Актуальные проблемы индукционного нагрева (АРІН-09). СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. С. 31-39.

13. *Demidovich V.* Computer simulation and optimal designing of energy-saving technologies of the induction heating of metals // Thermal Engineering. 2012. Vol. 59. N 14. P. 1023-1034.

14. *Demidovitch V.* Induction installations for heating long cylindrical billets before metal forming / V.Demidovitch, B.Nikitin, V.Olenin // Russian Metallurgy. 2007. № 8. С. 98-102.

15. *Demidovitch V.* Precise induction heating of non-ferrous cylindrical billet / V. Demidovich, I. Rastvorova // Asian Journal of Applied Sciences. 2013. Vol. 2. N 3. P. 310-317.

16. *Demidovitch V.* Precise induction heating of Ti and Zr billets / V.Demidovich, I.Rastvorova, V.Olenin // Heat Processing. 2011. N 3. P. 266-270.

17. *Jae Chan C.* The influence of induction heating on the microstructure of A356 for semi-solid forging / Jae Chan C., Hyung Jin P., Byung Min K. // Journal of Materials Processing Technology. 1999. Vol. 87. P. 46-52.

18. *Jung H.* Induction heating process of an Al-Si aluminum alloy for semi-solid casting and its resulting microstructure / H.Jung, C.Kang // Journal of Materials Processing Technology. 2002, Vol. 120. P. 355-364.

19. *Jung H.* The induction heating process of semi-solid aluminium alloys for thixoforming and theirmicrostructure evaluation // Journal of Materials Processing Technology. 2000. Vol. 105. P. 176-190.

***Автор* И.И.Растворова**, *д-р техн. наук, заведующая кафедрой, rastvorova@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья принята к публикации 07.12.2016.