



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-60-63>
УДК 621.74.047

Поступила 30.09.2020
Received 30.09.2020

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКЕ

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. А. ХАРЬКОВ, Д. А. МЕШКОВ, А. М. КОВАЛЕВ, И. О. САЗОНЕНКО,
Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11.
E-mail: maruko46@mail.ru
Г. В. КОМИССАРОВ, ОАО «Могилевлифтмаш», г. Могилев, Беларусь

Рассмотрены аспекты тепловых явлений, сопутствующих процессу производства биметаллических заготовок в условиях малых глубин проникновения вихревых токов, по сравнению с размером нагреваемого тела. Смоделированы различные условия распределения тепла в нагреваемом слое и его отвода с применением дифференцированного теплового сопротивления. На основе анализа распределения температур в различных вариантах определены перспективные пути совершенствования данной технологии.

Ключевые слова. Индукционный нагрев, наплавка, биметалл, тепловые процессы.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Анализ тепловых процессов при индукционной наплавке / Е. И. Марукович, В. А. Харьков, Д. А. Мешков, А. М. Ковалев, И. О. Сазоненко, Г. В. Комиссаров // *Литье и металлургия*. 2020. № 4. С. 60–63. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-60-63>.

ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES DURING INDUCTION SURFACING

E. I. MARUKOVICH, V. A. KHARKOV, D. A. MESHKOV, A. M. KOVALEV, I. O. SAZONENKO,
Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus,
11, Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: maruko46@mail.ru
G. V. KOMISSAROV, OJSC «Mogilevliftmash», Mogilev, Belarus

Aspects of thermal phenomena associated with the production process of bimetallic billets in conditions of small penetration depths of eddy currents compared to the size of the heated body are considered. Various conditions of heat distribution in the heated layer and its removal are modeled using differentiated thermal resistance. Based on the analysis of the temperature distribution in various situational variants, promising ways to improve this technology are identified.

Keywords. Induction heating, surfacing, bimetals, thermal processes.

For citation. Marukovich E. I., Kharkov V. A., Meshkov D. A., Kovalev A. M., Sazonenko I. O., Komissarov G. V. Analysis of thermal processes during induction surfacing. *Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 4, pp. 60–63. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-60-63>.

Индукционный нагрев широко используют в промышленности при плавке металлов, термообработке, пайке, термической правке [1]. Созданы десятки способов и технологических процессов для индукционной обработки различных материалов. Применение индукционного нагрева по сравнению с другими видами нагрева позволяет организовывать компактные производства, не требующие значительных производственных площадей, а также получить экономию топливно-энергетических ресурсов. Вместе с тем, условия постоянного повышения стоимости энергоресурсов создают предпосылки для развития современных энергоэффективных технологий, использующих данное направление [2].

В ИТМ НАН Беларуси разрабатывается технология получения биметаллических заготовок с использованием принципа индукционного нагрева [3]. Биметаллическая заготовка предназначена для изготовления торцового диска пластинчатого насоса (рис. 1).

Заготовка представляет собой стальное основание с наплавленным на него бронзовым слоем (рис. 2). Основание изготавливается из стали 20 ГОСТ 1050–88 диаметром 156 мм и высотой 41 мм. На верхнем торце имеется полость диаметром 146 мм, глубиной 15 мм, на поверхность которой наплавляется алюминиевая бронза БрАЖ 9–1,5 по ГОСТ 18175–78.

Используемая для наплавки алюминиевая бронза характеризуется повышенной по сравнению с оловянными бронзами усадкой и дает в процессе затвердевания концентрированную усадочную раковину [4].



Рис. 1. Торцовая крышка
пластинчатого насоса



Рис. 2. Биметаллическая
заготовка

В большинстве случаев в биметаллической заготовке торцового диска при толщине бронзового слоя, не превышающем 10 мм, наблюдается не одна концентрированная усадочная раковина, а несколько. На рис. 3 показана биметаллическая отливка с частично удаленным (на глубину 8 мм) бронзовым слоем.

В связи с этим одна из требующих решения задач – локализация усадочных явлений в центральной зоне биметаллической заготовки. Впоследствии при окончательной механической обработке центральная зона удаляется. Для формирования усадочной раковины в центре заготовки необходимо обеспечить затвердевание жидкого металла в данной области в последнюю очередь. Соответственно это требует определенного распределения температур по поверхности заготовки в процессе затвердевания жидкого металла.



Рис. 3. Биметаллическая заготовка
после удаления части наплавленного слоя:
1 – стальное основание; 2 – бронзовый слой; 3 – раковины

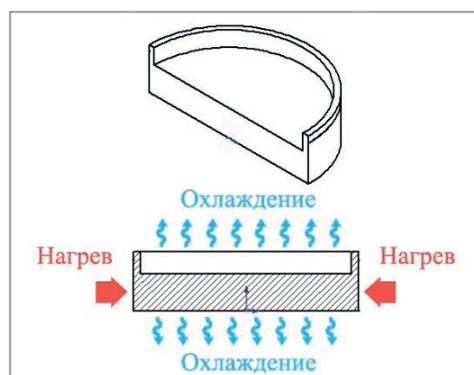


Рис. 4. Схема подвода и отвода тепла

В целях поиска путей решения указанной задачи было проведено математическое моделирование распределения температур по поверхности заготовки при ее нагреве. В связи с малой глубиной проникновения тока в металлы на высоких частотах индукционный нагрев можно рассматривать как поверхностный. Схема ввода тепла через боковую поверхность заготовки и отвода тепла через торцевые поверхности показана на рис. 4.

В модель ввели ряд упрощений, в частности, не учтена зависимость значений теплоемкости и теплопроводности от температуры, произведена замена потоков тепла, отводимого соответственно теплопроводностью, излучением и конвекцией единым тепловым потоком, и тепловые потоки заданы равномерно распределенными по поверхностям. Но в данном конкретном случае больший интерес представляет качественная картина явления, чем количественная. Базовым вариантом для расчета было стальное основание без бронзового слоя. Для повышения достоверности моделирования использовали исходные данные реального процесса. Расчеты соответствуют установившемуся (стационарному) распределению температур. Результат моделирования – распределение температур в радиальном направлении (по верхней торцовой поверхности стального основания) показано на рис. 5.

Расчет показал наличие значительного перепада температур в радиальном направлении. Минимальная температура – в центральной зоне, там, где предпочтительно должен находиться тепловой узел для

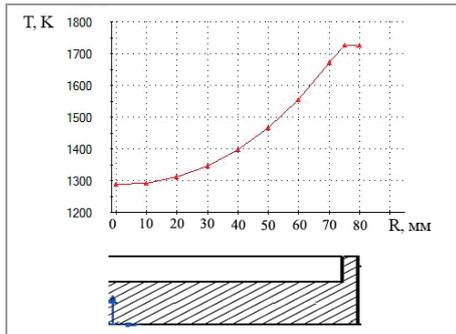


Рис. 5. Радиальное распределение температур на стальной основе

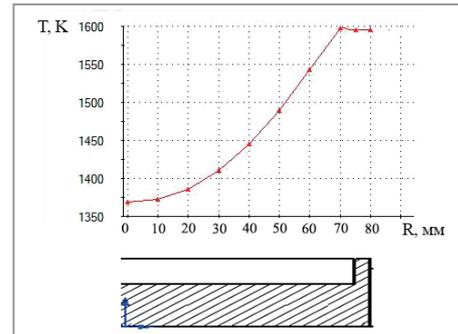


Рис. 6. Распределение температур при наличии бронзового слоя

выведения усадочных явлений. Данная модель рассматривалась нами в качестве базовой, которую по необходимости можно модифицировать в нужном направлении.

В следующем варианте расчета в базовую модель вводили верхний слой алюминиевой бронзы толщиной 10 мм. На рис. 6 показано расчетное распределение температур при наличии на металлической основе бронзового слоя.

В этом случае наблюдается уменьшение перепада температур в радиальном направлении. Но разница температур между центральной частью и периферией имеет еще значительную величину.

В связи с этим представляет интерес вариант с дифференцированным отводом тепла от верхней поверхности модели. В модель были введены условия увеличенного теплоотвода в периферийной зоне (по сравнению с центральной зоной). На рис. 7 представлено распределение температур этого варианта. Расчет показывает, что, изменяя интенсивность отводимого теплового потока, можно достаточно эффективно влиять на распределение температур на поверхности нагреваемой заготовки.

По результатам моделирования тепловой поток считался подведенным к боковым поверхностям основания. Это соответствует реальному индукционному нагреву на частотах 28–30 кГц, когда глубина проникновения тока вследствие скин-эффекта не превышает 4 мм. Частота – важный параметр индукционного нагрева, он определяет глубину проникновения тока в металл. С этой точки зрения интересен вариант расчета в условиях, когда глубина проникновения тока составляет половину диаметра заготовки, т.е. сквозного нагрева. Известно, что при проникновении электромагнитной волны в проводящую

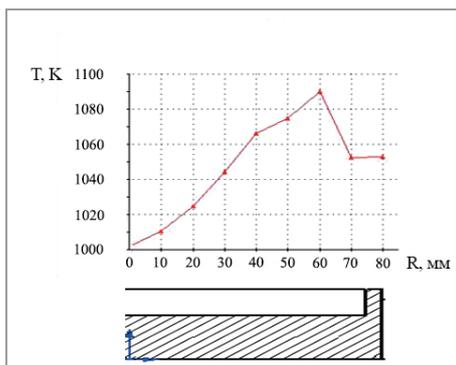


Рис. 7. Распределение температур с дифференциальным верхним теплоотводом

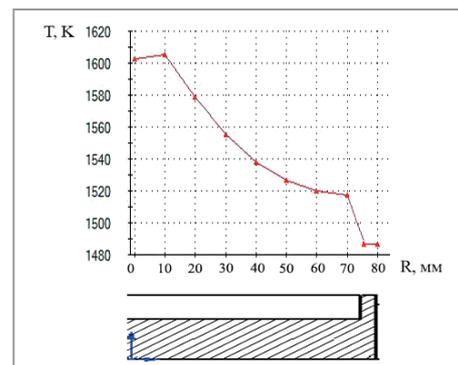


Рис. 8. Распределение температур с экспоненциальным распределением теплового потока

среду характерно ее экспоненциальное затухание по мере распространения в глубь проводящей среды [4]. С учетом этого условия и было проведено моделирование распределения температур по поверхности заготовки. Упрощением в данной модели является условие равномерности потока электромагнитной индукции, проходящего через биметаллическую заготовку. На рис. 8 представлено смоделированное распределение температур для частоты 41 Гц и глубины проникновения тока 78 мм.

Расчет показал, что при низких частотах происходит благоприятный нагрев с максимумом температуры в центре заготовки. Однако такой нагрев сложно реализовать технически. В первую очередь это вызвано тем, что в установках индукционного нагрева, использующих промышленную частоту, резко

возрастают электродинамические усилия в системе индуктор-деталь и соответственно создаваемые ими вибрации [5]. Вследствие этих причин резко увеличиваются металлоемкость и габаритные размеры установок индукционного нагрева, работающих на промышленных частотах. Повышенные капитальные затраты на технологическую оснастку существенным образом сказываются на конечной себестоимости продукции.

Анализ представленных вариантов расчета теплового состояния модели позволяет сделать определенные выводы. Для обеспечения равномерного распределения температур при индукционном нагреве перспективен следующий комплексный подход: варьирование глубины проникновения тока путем регулирования частоты ВЧ-источника; дифференцированный отвод тепла от верхней поверхности заготовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Компания EFD INDUCTION [электронный ресурс] / интеллектуальный нагрев для высокотехнологичных цепей. – г. Санкт-Петербург, 2017. <http://www.efd-induction.com>.
2. **Гордиенко А. И., Михлюк А. И., Вегера И. И.** Индукционная термическая обработка в машиностроении: анализ, проблемы и перспективы развития // Литье и металлургия. 2010. № 1–2. С. 140–148.
3. **Земцов В. А., Мешков Д. А., Сазоненко И. О.** Метод изготовления биметаллических дисков сталь – алюминиевая бронза // Литье и металлургия. 2008. № 1. С. 126–128.
4. **Галдин Н. М., Чернега Д. Ф., Иванчук Д. Ф.** Цветное литье: Справ. М.: Машиностроение, 1989. 212 с.
5. **Слухоцкий, А. Е.** Установки индукционного нагрева. Л.: Энергоиздательство, 1981. 328 с.

REFERENCES

1. EFD INDUCTION [electronic resource] / intelligent heating for high-tech circuits. – г. Санкт-Петербург, 2017. <http://www.efd-induction.com>.
2. **Gordienko A. I., Mihljuk A. I., Vegera I. I.** Indukcionnaja termicheskaia obrabotka v mashinostroenii: analiz, problemy i perspektivy razvitiia [induction heat treatment in machinery: analysis, problems and prospects for development] . *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2010, no. 1–2, pp. 140–148.
3. **Zemcov V. A., Meshkov D. A., Sazonenko I. O.** Metod izgotovlenija bimetallicheskih diskov stal' - aljuminievaja bronza [method of manufacturing bimetallic discs steel - aluminum bronze]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2008, no. 1, pp. 126–128.
4. **Galdin N. M., Chernega D. F., Ivanchuk D. F.** *Cvetnoe lit'e* [Colored casting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 212 p.
5. **Sluhockij, A. E.** *Ustanovki indukcionnogo nagreva* [Induction heating installations]. Leningrad, Jenergoizdatel'stvo Publ., 1981, 328 p.