

УДК 621.313.3:621.365.5

НАГРЕВ НЕМАГНИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО И ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

А.И. Алиферов, В.В. Жуловян, А.Э. Морев, В.А. Промзелев
Новосибирский государственный технический университет

В различных странах создается оборудование индукционного нагрева немагнитных цилиндрических изделий во вращающемся магнитном поле постоянных магнитов. Практический интерес к таким индукционным системам для сквозного нагрева изделий из немагнитных металлов с малым удельным электросопротивлением (алюминия, меди, бронзы) объясняется его экономичностью и эффективностью по сравнению с индукционными установками, нагревающими такое изделие в продольном переменном магнитном поле. При индукционном нагреве данных металлов в продольном переменном магнитном поле удастся обеспечить электрический КПД процесса нагрева не более 0,50...0,55. В то же время электрический КПД нагрева таких заготовок во вращающемся магнитном поле постоянных магнитов может достигать до 0,75...0,85. Для исследования энергетических, электромеханических и температурных режимов установок индукционного нагрева с постоянными магнитами была разработана численная модель, позволяющая решать сопряженную электромагнитную и тепловую задачу нагрева алюминиевых изделий с прямоугольным и цилиндрическим поперечным сечением.

Ключевые слова: вращающееся магнитное поле постоянных магнитов, индукционный нагрев, активная мощность в нагреваемом изделии, механический момент сопротивления нагреваемого изделия, температурное поле, скорость вращения магнитного поля, число пар полюсов, концентраторы магнитного поля.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-4-30-43

Введение

В настоящее время нагреву изделий из немагнитных металлов в переменном магнитном поле, создаваемом вращающимися системами с постоянными магнитами, уделяется особое внимание [1–5]. Это связано с тем, что в промышленности такие изделия нагреваются в установках индукционного нагрева в продольном переменном магнитном поле, имеющих электрический КПД не более 0,5...0,55. Привлекательностью нагрева таких изделий в поперечном вращающемся магнитном поле постоянных магнитов является его потенциальная возможность в достижении электрического КПД до 0,75...0,85 [6–7]. В ряде публикаций описаны результаты исследования энергетических, электрических, механических параметров и температурных режимов нагрева только цилиндрических немагнитных изделий в установках, реализующих этот вид нагрева [8–10]. В статье приводятся результаты сравнения режимов нагрева алюминиевых изделий прямоугольного и цилиндрического сечения.

1. Постановка задачи

На рис. 1 представлена схема установки индукционного нагрева изделий цилиндрического и прямоугольного поперечного сечения во вращающемся поле постоянных магнитов.

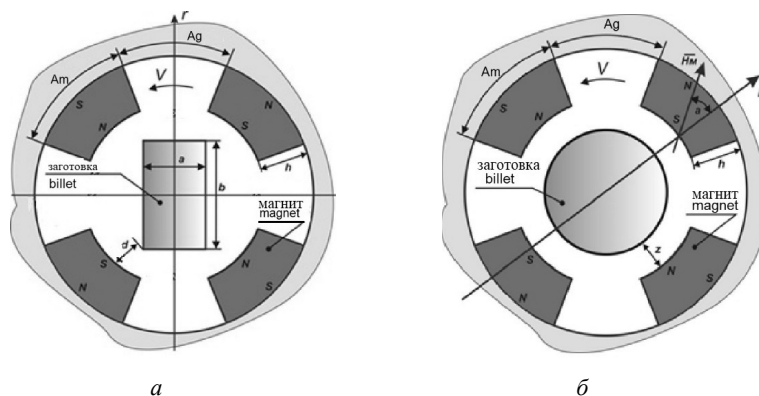


Рис. 1 – Схема установки индукционного нагрева изделия прямоугольного (а) и цилиндрического (б) поперечного сечения во вращающемся поле постоянных магнитов

Fig. 1 – A diagram of induction heating installation of rectangular (a) and cylindrical (b) cross sections in the rotating field of permanent magnets

В работе выполняется нагрев алюминиевых изделий до температуры 550 °С. Технологический зазор между ребром прямоугольного (или поверхностью цилиндрического) изделия и магнитами принимался равным 10 мм. Высота магнитов $h = 15$ мм, остаточная индукция 1 Тл, коэрцитивная сила 1050 кА/м (направление намагничивания – радиальное). Процесс конвективного теплообмена поверхности вращающегося изделия с окружающей средой выполнялся при граничном условии третьего рода [11]. В силу малого значения степени черноты алюминия теплопередача излучением между изделием и системой постоянных магнитов не учитывалась.

Созданная численная параметрическая модель предназначена для расчета электромагнитных и тепловых процессов в нагреваемом изделии с учетом изменяющихся физических свойств материала нагреваемого изделия и нелинейного теплообмена конвекцией на его поверхности [3]. Посредством разработанной модели возможно исследование электромагнитных и электромеханических параметров, энергетических характеристик и распределения температуры по сечению в функциональной зависимости от скорости вращения системы магнитов относительно нагреваемого изделия, числа пар полюсов магнитной системы, физических свойств нагреваемой заготовки и системы постоянных магнитов.

На рис. 2 представлен алгоритм расчета взаимосвязанной электромагнитной и тепловой задачи.

Модуль решения электромагнитной задачи включает в себя построение геометрии системы, наложение свойств материалов и среды на соответствующие поверхности модели, наложение конечно-элементной сетки, наложение граничных условий для решения электромагнитной задачи, таких как значение и направление вектора коэрцитивной силы магнитов и равенство нулю z компоненты векторного магнитного потенциала на внешней границе воздушного объема.

В данной модели считается, что электромагнитная задача в течение одной секунды достигает установившегося режима, поэтому на каждом временном шаге мы пользуемся установившимися параметрами электромагнитного поля.

Модуль расчета интегральных параметров позволяет рассчитать такие интегральные параметры, как активная мощность, выделяющаяся в изделия, а также механический момент сопротивления вращению изделия.

Модуль решения тепловой задачи строит геометрию системы, задает теплофизические свойства материала изделия в соответствии с температурным

полем, рассчитанным на предыдущем временном шаге, теплофизические свойства элементов магнитной системы и среды, строит конечно-элементную сетку, задает граничные условия, необходимые для решения тепловой задачи. Теплообмен на поверхностях нагреваемого изделия и магнитной системы учитывался законом Ньютона–Рихмана, а внутренние источники энергии берутся из предыдущего решения электромагнитной задачи.



Рис. 2 – Алгоритм расчета взаимосвязанной электромагнитной и тепловой задачи:

τ – текущее время; τ_n – время нагрева

Fig. 2 – A calculation algorithm of interrelated electromagnetic and thermal problems:

τ – is current time; τ_n – is heating time

Модуль сохранения результатов решения тепловой задачи сохраняет результаты текущего решения, что позволяет получить температурные зависимости во времени.

2. Результаты исследования

2.1. Нагрев изделий цилиндрического поперечного сечения

При исследовании электромагнитных процессов были проведены численные расчеты при следующих варьируемых параметрах: скорости вращения магнитной системы ω ; числе пар полюсов в магнитной системе n ; отношении углового размера зазора к угловому размеру магнита Ag/Am .

На рис. 3 представлены зависимости активной мощности, выделяющейся в цилиндрическом изделии, от скорости вращения магнитной системы при технологическом зазоре $z = 10$ мм и отношении углового размера зазора к угловому размеру магнита $Ag/Am = 1$ для различного количества пар полюсов. С увеличением скорости вращения магнитной системы вокруг изделия, а также с

увеличением количества пар полюсов магнитов происходит значительное возрастание интегральной активной мощности, выделяющейся в изделии.

На рис. 4 показана зависимость активной мощности, выделяющейся в изделии, от скорости вращения магнитной системы при технологическом зазоре $z = 10$ мм и трех парах полюсов для различных отношений углового размера зазора к угловому размеру магнита Ag/Am .

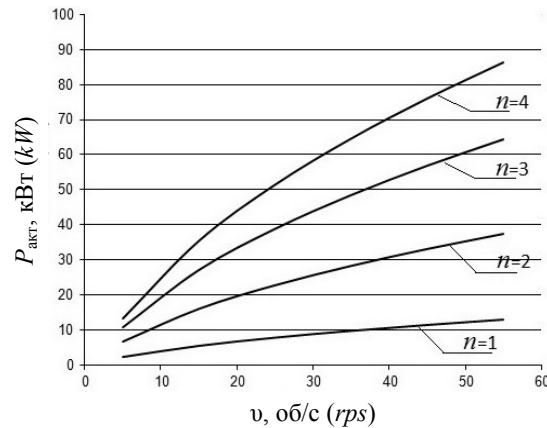


Рис. 3 – Зависимость интегральной активной мощности в нагреваемом цилиндрическом изделии от скорости вращения магнитной системы

Fig. 3. Dependence of an integral active power in the heated cylinder on the rotation speed of a magnet system

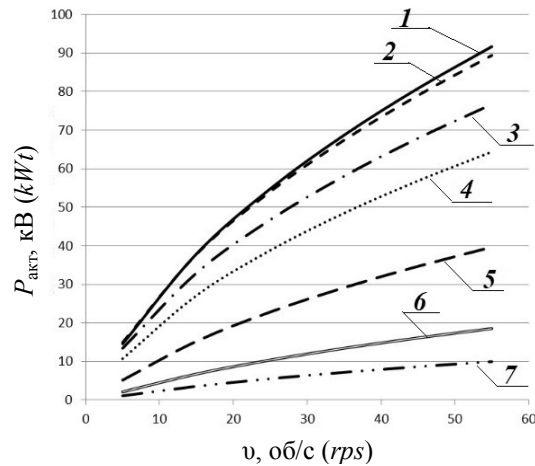


Рис. 4 – Зависимость активной мощности, выделяющейся в изделии, от скорости вращения магнитной системы при различных отношениях Ag/Am :

1 – $Ag/Am = 0,1$; 2 – $Ag/Am = 0,25$; 3 – $Ag/Am = 0,5$; 4 – $Ag/Am = 1$; 5 – $Ag/Am = 3$; 6 – $Ag/Am = 6$; 7 – $Ag/Am = 9$

Fig. 4. Dependence of active power released in the billet on the rotation speed of a magnet system at various ratios Ag/Am :

1 – $Ag/Am = 0,1$; 2 – $Ag/Am = 0,25$; 3 – $Ag/Am = 0,5$; 4 – $Ag/Am = 1$; 5 – $Ag/Am = 3$; 6 – $Ag/Am = 6$; 7 – $Ag/Am = 9$

Как видно, увеличение соотношения A_g/A_m приводит к значительному уменьшению интегральной активной мощности, выделяющейся в нагреваемом цилиндрическом изделии. Увеличение скорости вращения магнитной системы приводит к существенному возрастанию активной мощности, выделяемой в нем.

На рис. 5 и 6 представлены зависимости распределения температурного поля в цилиндрическом изделии от числа пар полюсов n и скорости вращения системы постоянных магнитов. Из рис. 5 и 6 видно, что с повышением скорости вращения и числа пар полюсов магнитной системы происходит увеличение скорости нагрева изделия. Это связано с возрастанием активной мощности, выделяющейся в нем. Но увеличение числа пар полюсов выше трех приводит к уменьшению мощности, выделяемой в нем, и скорости его нагрева. Это связано с тем, что большая часть магнитного потока замыкается между полюсами магнитов, не проникая в нагреваемое изделие.

Следует отметить, что в выбранном диапазоне изменения геометрических и скоростных характеристик системы нагрева в цилиндрическом изделии температурные перепады не превышают $5...10^\circ\text{C}$ в связи с равномерным по угловой координате распределением интегральной мощности внутренних источников теплоты и высокой теплопроводностью нагреваемого изделия.

2.2. Нагрев изделий прямоугольного поперечного сечения

На рис. 7 и 8 представлены зависимости распределения температурного поля в изделии прямоугольного поперечного сечения от геометрических и режимных параметров нагрева.

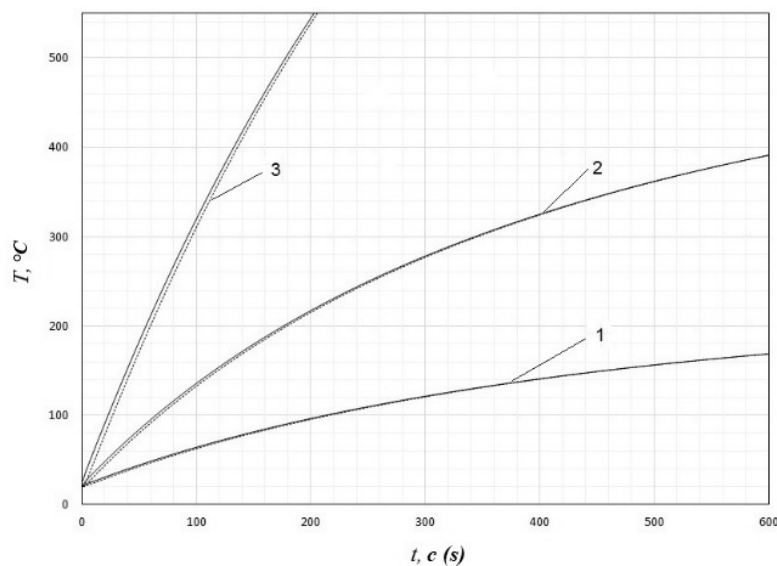


Рис. 5 – Зависимость изменения температуры от времени в цилиндрическом изделии в установке с тремя парами полюсов:

зазор $z = 10$ мм; 1 – 10 об/с; 2 – 20 об/с; 3 – 50 об/с

Fig. 5 – Temperature-time relationship in a cylindrical billet in the installation with 3 pole pairs:

gap $z = 10$ mm; 1 – 10 rpm; 2 – 20 rpm; 3 – 50 rpm

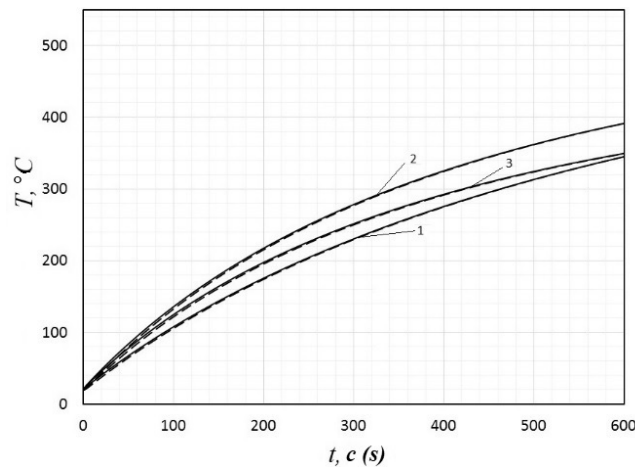


Рис. 6 – Зависимость изменения температуры от времени в цилиндрическом изделии в установке при частоте вращения 20 об/с:

зазора $z = 10$ мм (1 – две пары полюсов; 2 – три пары полюсов; 3 – четыре пары полюсов)

Fig. 6 – Temperature-time relationship in a cylindrical billet in the installation with a rotation speed of 20 rps:

the z gap = 10 mm (1 – 2 pole pairs, 2 – 3 pole pairs, 3 – 4 pole pairs)

По рис. 7 и 8 видно, что в прямоугольном изделии, вне зависимости от частоты магнитного поля, более интенсивно разогреваются углы, а затем, за счет теплопроводности от зоны выделения энергии, остальная часть тела. С повышением скорости вращения и числа пар полюсов магнитной системы происходит увеличение скорости нагрева и максимального температурного перепада в изделии, значительно превышающего допустимые по технологии сквозного нагрева температурного перепада. Поэтому требуется разработка устройств, выравнивающих температурный перепад.

2.3. Применение концентраторов электромагнитного поля

Выравнивание температурного поля в изделиях прямоугольного сечения можно обеспечить посредством применения концентраторов магнитного поля, которые при вращении системы магнитов вокруг модуля, включающего нагреваемое изделие и концентраторы, создает в изделии пульсирующее магнитное поле. Для исследования влияния концентраторов магнитного поля на распределение параметров магнитного поля (векторного магнитного потенциала и индукции), а также активной мощности, выделяемой в изделии, разработана модель в программном комплексе ANSYS.

При моделировании процесса нагрева цилиндрического и нецилиндрического изделий были применены принципиально разные методы решения.

При моделировании процесса нагрева цилиндрического изделия модель была построена таким образом, что вращение сеточной области, представляющей собой магнитную систему, не производилось. Вращение магнитной системы учитывалось дополнительным слагаемым в законе полного тока для областей, моделирующих магнитную систему:

$$\gamma[\vec{V} \times \vec{B}].$$

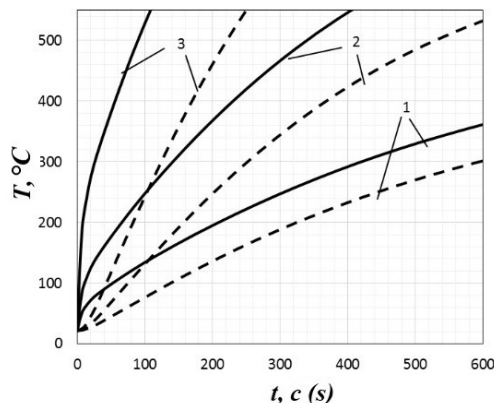


Рис. 7 – Зависимость распределения температуры от времени в прямоугольном изделии сечением 180×90 мм (зазора $d = 10$ мм) в установке с тремя парами полюсов:

1 – 10 об/с; 2 – 20 об/с; 3 – 50 об/с

Fig. 7 – Temperature-time relationship in a rectangular billet with the section of 180×90 mm (gap $d = 10$ mm) in the installation with 3 pole pairs:

1 – 10 rps; 2 – 20 rps; 3 – 50 rps

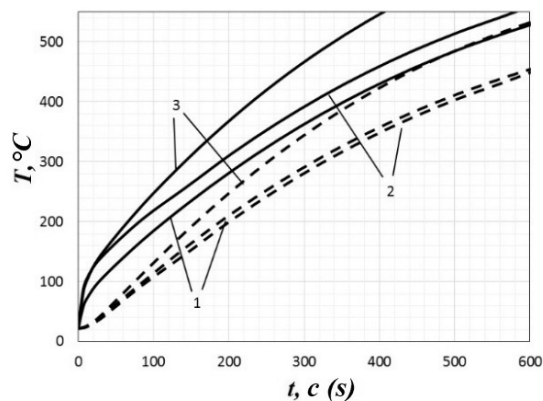


Рис. 8 – Зависимость изменения температуры от времени в прямоугольном изделии сечением 180×90 мм в установке при частоте вращения 20 об/с:

1 – $n = 2$; 2 – $n = 3$; 3 – $n = 4$

Fig. 8 – Temperature-time relationship in a rectangular billet with the section of 180×90 mm in the installation with a rotation speed of 20 rps:

1 – $n = 2$; 2 – $n = 3$; 3 – $n = 4$

Для уменьшения времени расчета были приняты следующие допущения:

- цилиндрическое изделие разбивалось на концентрические цилиндры, внутри которых выделение активной мощности полагалось равномерным;

• так как тепловая задача более инерционна, чем электромагнитная, то электромагнитная задача на каждом временном шаге решается стационарно.

Эти допущения позволили значительно упростить процесс решения и уменьшить время моделирования, при этом сохранить высокое качество решения.

При моделировании процесса нагрева нецилиндрического изделия невозможно применить эти допущения из-за неравномерного по поверхности изделия распределения электромагнитного поля. Моделирование процесса нагрева решается путем вращения сетки. Решение задачи в такой постановке требует больших вычислительных и временных ресурсов.

Расчеты взаимосвязанной электромагнитной и тепловой задачи в нагреваемом изделии выполнялись в программном комплексе *ANSYS* на суперкомпьютере со следующими характеристиками: размер оперативной памяти 96 Гб; два процессора Intel Xeon X5680 3.33 МГц по шесть ядер каждый.

В таблице показаны исходные данные для расчета: геометрические параметры системы нагрева, электромагнитные свойства магнитов и концентраторов магнитного поля.

Исходные данные

Input data

Наименование	Единица измерения	Величина
Длина прямоугольной загрузки	м	0,140
Ширина прямоугольной загрузки	м	0,100
Ширина магнита	м	0,112
Высота магнита	м	0,1275
Остаточная индукция магнитов	Тл	1,08269
Козрцитивная сила магнитов	А/м	1 050 000
Удельное сопротивление концентраторов	Ом · м	$8 \cdot 10^{-7}$
Магнитная проницаемость концентраторов		130

На рис. 9 представлены схемы установки индукционного нагрева с концентраторами электромагнитного поля. На рис. 10 показаны временные зависимости интегральной мощности, выделяемой в изделии в системе «прямоугольное изделие – вращающиеся магниты» при отсутствии и наличии концентраторов магнитного поля.

Применение концентраторов магнитного поля приводит к уменьшению активной мощности, выделяемой в изделии. Причем такое уменьшение получается более существенным при установке концентраторов вдоль боковых поверхностей изделия, а не на ее углах.

На рис. 11 приведено распределение температуры по периметру прямоугольного изделия *ABCD*, показанному на рис. 9. Зависимости приведены для разного момента времени и активной мощности. Зависимость 1 соответствует системе без концентраторов магнитного поля с выделяемой мощностью – 25 кВт, график приведен на момент времени 132,25 с; зависимость 2 соответствует системе с концентраторами, закрепленными на боковых поверхностях изделия с выделяемой мощностью 18,5 кВт, график приведен на момент времени 228,51 с; зависимость 3 соответствует системе с концентраторами, закрепленными на углах прямоугольного изделия с выделяемой мощностью 6,5 кВт; график приведен на момент времени 723,52 с. Распределение температуры, представленное на рис. 11, иллюстрирует существенное влияние концентраторов магнитного поля на распределение температуры по поверхности прямоугольного изделия.

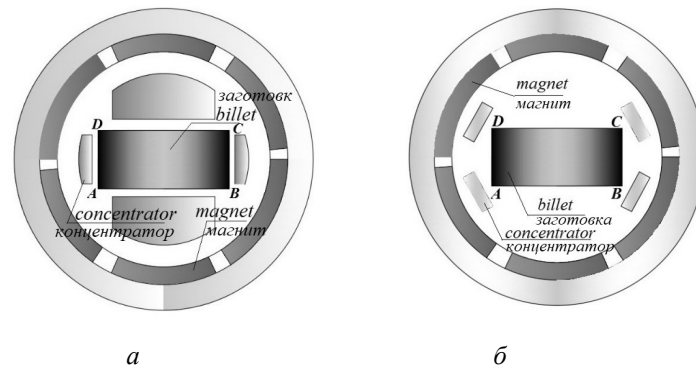


Рис. 9 – Схема установки индукционного нагрева:

a – с концентраторами магнитного поля у боковых поверхностей;
б – с концентраторами магнитного поля на углах изделия

Fig. 9 – A diagram of an induction heating installation:

a – with concentrators of a magnetic field at lateral sides; *b* – with concentrators of a magnetic field at billet angles

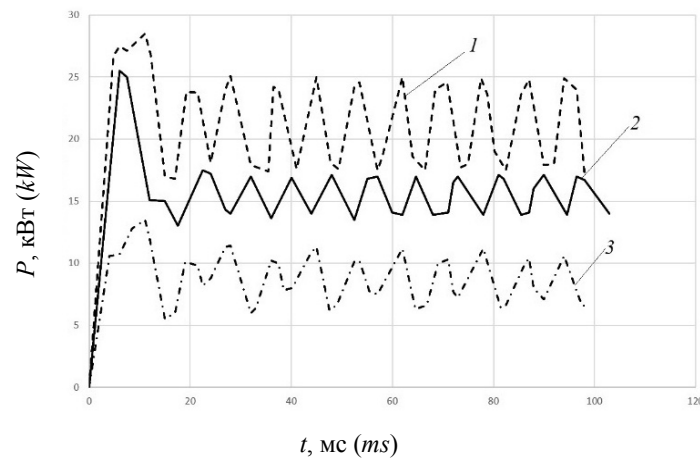


Рис. 10 – Временная зависимость интегральной активной мощности для системы:

1 – без концентраторов электромагнитного поля; 2 – с концентраторами электромагнитного поля на углах изделия; 3 – с концентраторами у боковых поверхностей

Fig. 10 – Time dependence of an integral active power for the system:

1 – is without concentrators of an electromagnetic field; 2 – is with concentrators of an electromagnetic field at billet angles; 3 – is with concentrators at lateral sides

На рис. 12 представлена зависимость интегрального механического момента сопротивления прямоугольного изделия при различном исполнении системы индукционного нагрева. Интегральный механический момент, испытываемый прямоугольным изделием, при применении концентраторов уменьшается. Максимальное его уменьшение получается при концентраторах, расположенных вдоль боковых поверхностей изделия.

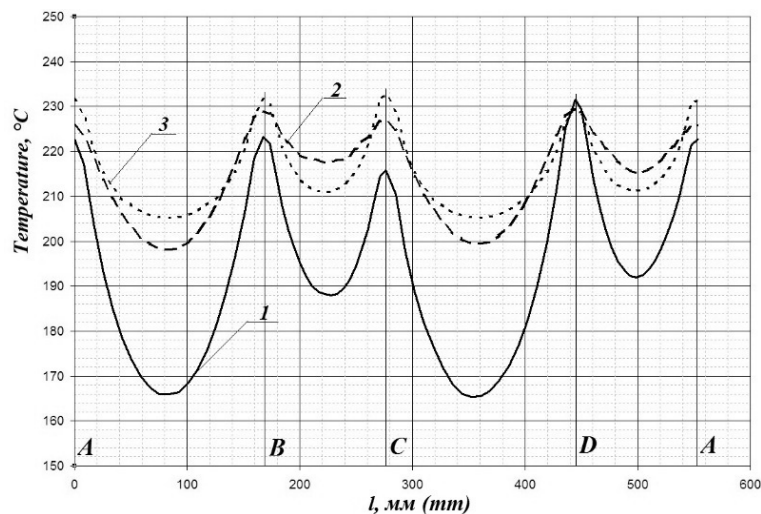


Рис. 11 – Распределение температуры по периметру прямоугольного изделия:

1 – без концентраторов магнитного поля; 2 – с концентраторами магнитного поля на углах изделия; 3 – с концентраторами у боковых поверхностей

Fig. 11 – Time dependence of an integral active power for the system:

1 – is without concentrators of an electromagnetic field; 2 – is with concentrators of an electromagnetic field at billet angles; 3 – is with concentrators at lateral sides

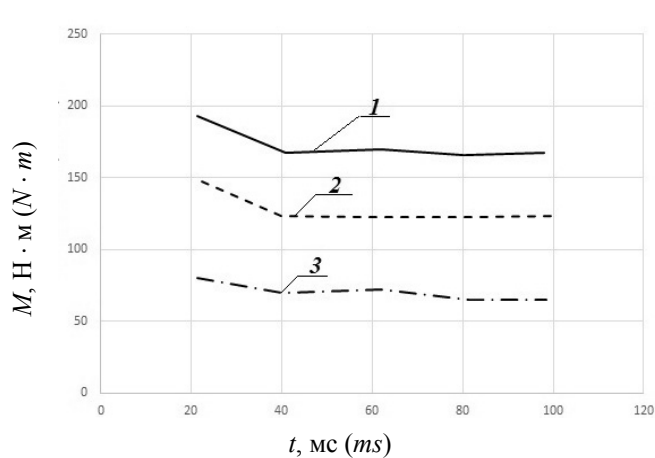


Рис. 12 – Зависимость интегрального момента сопротивления прямоугольного изделия:

1 – без концентраторов; 2 – с концентраторами на углах изделий; 3 – с концентраторами у боковых поверхностей

Fig. 12. Dependence of an integral resisting moment of a rectangular billet:

1 – is without concentrators; 2 – is with concentrators at angles of the billet; 3 – is with concentrators at lateral sides

Заключение

Модель, разработанная в программном комплексе ANSYS, позволила рассчитать связанную электромагнитную и тепловую задачу нагрева немагнитного изделия прямоугольного и цилиндрического поперечного сечения во вращающемся магнитном поле постоянных магнитов.

Получены зависимости интегральной активной мощности, выделяемой в нагреваемом изделии, механического момента сопротивления изделия вращению магнитного поля, распределения температуры по сечению нагреваемых изделий прямоугольного и цилиндрического сечения от конструктивного исполнения нагревательного узла, скорости вращения магнитного поля, числа пар полюсов.

При нагреве изделия цилиндрического сечения в принятом диапазоне выбранных параметров температурные перепады не превышают 50...60 °С, максимально допустимые по технологии прессования.

Установлено, что в алюминиевых изделиях прямоугольного поперечного сечения возможно обеспечение температурных перепадов между точками ребра, образованного боковыми поверхностями и точками оси прямоугольного сечения, менее 60 °С. Но это можно получить только при малых скоростях нагрева, обеспечиваемых малыми скоростями вращения поперечного магнитного поля (менее 600 об/мин), при которых получается низкой тепловой КПД процесса нагрева.

Скорость нагрева и максимальный температурный перепад по сечению изделия увеличиваются с ростом числа пар полюсов и скорости вращения магнитной системы.

Применение концентраторов позволяет выровнять мощность внутренних источников тепла и температурное поле в прямоугольном изделии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mach F., Karban P., Doležel I.** Induction heating of cylindrical non-magnetic ingots by rotation in static magnetic field generated by permanent magnets // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. – 2012. – Vol. 236 (18). – P. 4732–4744.
2. Исследование электромагнитных параметров установок индукционного нагрева с постоянными магнитами / А.И. Инкин, А.В. Бланк, А.И. Алиферов, Е.Г. Порсев, В.А. Промзелев // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. – 2012. – № 1-1. – С. 178–182.
3. Исследование энергетических параметров систем индукционного нагрева с магнитами / А.И. Алиферов, Р.А. Бикеев, А.В. Бланк, А.Э. Морев, В.Н. Тимофеев // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. – 2014. – № 1 (54). – С. 122–127.
4. Patent WO2013128241. Device for induction heating of a billet / F. Dughiero, M. Forzan, M. Zerbetto. – Publ. date 06.09.2013.
5. **Инкин А.И., Алиферов А.И., Бланк А.В.** Каскадные Е-Н-схемы замещения для расчета магнитоэлектрических установок индукционного нагрева // *Электротехника*. – 2011. – № 6. – С. 36–41.
6. **Lupi S., Forzan M., Aliferov A.** Induction and direct resistance heating: theory and numerical modeling: monograph. – Heidelberg: Springer, 2015. – 370 p. – ISBN 978-3-319-03478-2. – doi: 10.1007/978-3-319-03479-9.
7. Multi rotors permanent magnet heater for controlling temperature distribution in aluminum billets / F. Dughiero, M. Forzan, C. Pozza, M. Zerbetto // *International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing MEP-2014, Hannover, September 16–19, 2014*. – Hannover: Leibniz University of Hannover, 2014. – P. 415–420.
8. Energetic and thermal performance of induction heating system with permanent magnets / A.I. Aliferov, R.A. Bikeev, D.S. Vlasov, V.A. Promzelev, A.E. Morev, S. Lupi // *2016 11th International Forum on Strategic Technology, June 1–3, 2016, Novosibirsk, Russia: proceedings of IFOST-2016*. – Novosibirsk, 2016. – Pt. 2. – P. 127–129. – ISBN 978-5-7782-2918-1.

9. Electromechanical and energetic characteristics of system of induction heating by permanent magnets / A.I. Aliferov, R.A. Bikeev, D.S. Vlasov, V.A. Promzelev, A.E. Morev // 17th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016, 30 June – 4 July 2016, Erlagol, Altai, Russia. – Novosibirsk, 2016. – P. 518–521. – doi: 10.1109/EDM.2016.7538790.
10. Особенности нагрева немагнитных изделий прямоугольного сечения во вращающемся поле постоянных магнитов / Р.А. Бикеев, В.А. Промзелев, А.В. Бланк, А.Э. Морев // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325, № 2. – С. 143–148.
11. Dughiero F., Forzan M., Lupi S. Induction heating of aluminum billets rotating in a DC magnetic field // VIII International Conference on Problems of Control and Modelling Complex Systems, Samara, June 24–29, 2006. – Samara, 2006. – P. 171–176.

HEATING OF NONMAGNETIC WORKPIECES OF CYLINDRICAL AND RECTANGULAR CROSS SECTION IN THE MAGNETIC FIELD OF ROTATING PERMOMENT MAGNETS

Aliferov A.I., Zhulovyan V.V., Morev A.E., Promzelev V.A.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

In various countries, induction heating equipment for non-magnetic cylindrical products in the rotating magnetic field of permanent magnets is created. Practical interest in such induction systems for the through heating of workpieces made of non-magnetic metals with a low electrical resistivity (aluminum, copper, bronze) is explained by its cost-effectiveness and efficiency in comparison with induction installations that heat such metals in a longitudinal alternating magnetic field. At induction heating of these metals in a longitudinal alternating magnetic field, it is possible to provide an electric efficiency of the heating process not more than 0.50–0.55. At the same time, heating of such billets in a rotating magnetic field of permanent magnets can reach up to 0.75–0.85. To study the power, electromechanical and temperature modes of induction heating units with permanent magnets, a numerical model was developed that allows solving the conjugate electromagnetic and thermal problem of heating aluminum billets with a rectangular and cylindrical cross section.

Keywords: Rotating magnetic field of permanent magnets, induction heating, active power in the heated product, mechanical moment of resistance of a heated workpiece, temperature field, rotation speed of a magnetic field, number of pole pairs, concentrators of a magnetic field.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-4-30-43

REFERENCES

1. Mach F., Karban P., Doležel I. Induction heating of cylindrical non-magnetic ingots by rotation in static magnetic field generated by permanent magnets. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2012, vol. 236 (18), pp. 4732–4744.
2. Inkin A.I., Blank A.V., Aliferov A.I., Porsev E.G., Promzelev V.A. Issledovanie elektromagnitnykh parametrov ustanovok induktsionnogo nagreva s postoyannymi magnitami [Investigation of the electromagnetic parameters of induction heating installations with permanent magnets] *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2012, no. 1-1, pp. 178–182.
3. Aliferov A.I., Bikeev R.A., Blank A.V., Morev A.E., Timofeev V.N. Issledovanie energeticheskikh parametrov sistem induktsionnogo nagreva s magnitami [Research of energy parameters of induction heating systems with magnets]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 1 (54), pp. 122–127.
4. Dughiero F., Forzan M., Zerbetto M. *Device for induction heating of a billet*. Patent, no. WO2013128241, 2013.

5. Inkin A.I., Aliferov A.I., Blank A.V. Kaskadnye E-N-skemy zameshcheniya dlya rascheta magnitoelektricheskikh ustanovok induktsionnogo nagreva [Cascade E-H-schemes of substitution for the calculation of magnetoelectric induction heating installations]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2011, no. 6, pp. 36–41. (In Russian).
6. Lupi S., Forzan M., Aliferov A. *Induction and direct resistance heating: theory and numerical modeling*. Heidelberg, Springer, 2015. 370 p. ISBN 978-3-319-03478-2. doi: 10.1007/978-3-319-03479-9.
7. Dughiero F., Forzan M., Pozza C., Zerbetto M. Multi rotors permanent magnet heater for controlling temperature distribution in aluminum billets. *International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic, Processing MEP-2014*, Hannover, September 16–19, 2014, pp. 415–420.
8. Aliferov A.I., Bikeev R.A., Vlasov D.S., Promzelev V.A., Morev A.E., Lupi S. Energetic and thermal performance of induction heating system with permanent magnets. *2016 11th International Forum on Strategic Technology. Proceedings of IFOST-2016*, June 1–3, 2016, Novosibirsk, Russia, pp. 127–129. ISBN 978-5-7782-2918-1.
9. Aliferov A.I., Bikeev R.A., Vlasov D.S., Promzelev V.A., Morev A.E. Electromechanical and energetic characteristics of system of induction heating by permanent magnets. *17th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016*, Erlangol, Altai, Russia, pp. 518–521. doi: 10.1109/EDM.2016.7538790.
10. Bikeev R.A., Promzelev V.A., Blank A.V., Morev A.E. Osobennosti nagreva nemagnitnykh izdelii pryamougol'nogo secheniya vo vrashchayushchemsya pole postoyannykh magnitov [Features of heating non-magnetic products of rectangular cross-section in a rotating field of permanent magnets]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 2, pp. 143–148.
11. Dughiero F., Forzan M., Lupi S. Induction heating of aluminum billets rotating in a DC magnetic field. *VIII International Conference on Problems of Control and Modelling Complex Systems, Samara*, June 24–29, 2006, pp. 171–176.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Алиферов Александр Иванович – родился в 1956 году, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой автоматизированных электротехнологических установок (АЭТУ) Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Область научных интересов: энерго- и ресурсосберегающие электротехнологии. Опубликовано более 200 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: alif@ngs.ru).

Aliferov Alexander Ivanovich (b. 1956) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, head of the department of automated electrotechnical installations in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on energy and resource saving electrotechnologies. He is the author of more than 200 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: alif@ngs.ru).



Жуловян Владимир Владимирович – родился в 1936 году, д-р техн. наук, профессор кафедры электротехнических комплексов НГТУ. Область научных интересов: разработка теории электро-механических преобразователей энергии с модулированным магнитным потоком, электропривод. Опубликовано 35 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: zhulovyan@mail.ru).

Zhulovyan Vladimir Vladimirovich (b. 1936) – Doctor of Sciences (Eng.) professor, Novosibirsk State Technical University. His research interests include development of the theory of electromechanical energy converters with a modulated magnetic flux and electric drives. He has published 35 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: zhulovyan@mail.ru).



Морев Андрей Эдуардович – родился в 1992 году, аспирант кафедры АЭТУ НГТУ. Область научных интересов: нагрев цветных металлов в переменном магнитном поле постоянных магнитов. Опубликовано более 20 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: glhficcup@yandex.ru).

Morev Andrey Eduardovich (b. 1992) – a postgraduate student at the department of automated electrotechnical installations in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on heating of non-ferrous metals in an alternating magnetic field of permanent magnets. He is the author of more than 20 scientific papers. (Address: Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: glhficcup@yandex.ru).



Промзелев Владислав Алексеевич – родился в 1988 году, инженер кафедры АЭТУ НГТУ. Область научных интересов: ресурсосберегающие и энергосберегающие электротехнологии. Опубликовано более 15 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: promzelev@mail.ru).

Promzelev Vladislav Alekseevich (b. 1988) – an engineer at the department of automated electrotechnical installations of the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on resource-and-energy saving electrotechnologies. He is the author of more than 15 scientific papers. (Address: Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: promzelev@mail.ru).

Статья поступила 04 октября 2018 г.
Received October 04, 2018

To References:

Aliferov A.I., Zhulovyan V.V., Morev A.E., Promzelev V.A. Nagrev nemagnitnykh izdelii tsilindricheskogo i pryamougol'nogo poperechnogo secheniya v magnitnom pole vrashchayushchikhsya postoyannykh magnetov [Heating of nonmagnetic workpieces of cylindrical and rectangular cross section in the magnetic field of rotating permanent magnets]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 4 (41), pp. 30–43. doi: 10.17212/1727-2769-2018-4-30-43.