

УДК 536.68

UDC 536.68

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧИ ПРОЦЕССА ЦЕНТРОБЕЖНОЙ БИМЕТАЛЛИЗАЦИИ С ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ НАГРЕВОМ**ANALYTICAL SOLUTION OF THE HEAT PROBLEM OF THE PROCESS OF CENTRIFUGAL BIMETALLIZATION WITH ELECTRIC ARC HEATING**

Глушко Сергей Петрович
к.т.н., доцент
E-mail: sputnik_s7@mail.ru

Glushko Sergei Petrovich
Cand.Tech.Sci., associate professor
E-mail: sputnik_s7@mail.ru

Беда Ксения Сергеевна
E-mail: ксuxa.13.8@yandex.ru

Beda Ksenia Sergeevna
E-mail: ксuxa.13.8@yandex.ru

Чичуа Нино Анзоровна
E-mail: nino_chichua@mail.ru
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Chichua Nino Anzorovna
E-mail: nino_chichua@mail.ru
Kuban state technological University, Krasnodar, Russia

В узлах различных машин применяются подшипники скольжения из биметалла: стальная основа - плакирующий антифрикционный слой. Биметаллическое исполнение подшипников повышает их эксплуатационные характеристики. Одним из способов получения таких подшипников является способ центробежной биметаллизации с нагревом независимой электрической дугой. Важным требованием такой технологии является равномерный прогрев заготовки по всей длине до образования сплошного слоя расплава плакирующего материала. Процесс биметаллизации требует температурного контроля, так как при перемещении электрической дуги возможны низкий нагрев или высокий нагрев за счет отвода тепла от торцов заготовки в установку и от наружной поверхности заготовки в окружающую среду. Приемлемым вариантом температурного контроля теплового процесса биметаллизации для промышленных условий является контроль по температуре наружной поверхности стальной основы. Для этого необходимо решить тепловую задачу связи между температурой на поверхности заготовки с температурой на границе раздела слоев. С этой целью используется численное решение математической модели теплового процесса, включающей в себя уравнение теплопроводности Фурье и теплообмен на торцах втулки по закону Ньютона. Эквивалентные коэффициенты теплообмена получают на основе расчетных и экспериментальных термограмм. Это трудоемкая работа. С целью минимизации времени отладки краевой задачи теплового процесса биметаллизации, в данной статье предлагается вариант предварительного моделирования на основе аналитического решения тепловой задачи биметаллизации

At the nodes of the various machines, we use plain bimetal bearings: a steel base - antifriction cladding layer. Bimetal bearings have increased performance. One of the ways of making such bearings is the way of centrifugal bimetalization with heating of the independent electric arc. An important requirement of this technology is a uniform heating of the workpiece along the entire length until the formation of a continuous layer of the molten cladding material. The process of bimetalization require temperature control, since within the movement of the electric arc, low heat or high heat are possible due to heat dissipation from the ends of the workpiece in the installation and from the outer surface of the workpiece to the environment. A viable option the temperature control of the heat process of bimetalization for industrial conditions is to control the temperature of the outer surface of the steel base. It is necessary to solve the heat problem of the relationship between the temperature on the surface of the workpiece with the temperature on the boundary layers. For this purpose the numerical solution of the mathematical model of the thermal process, which includes the heat transmitting equation of Fourier and heat transfer at the ends of the sleeve according to Newton's law. The equivalent coefficients of heat transfer are obtained based on calculated and experimental thermograms. This is a time-consuming work. To minimize the time of fixing the boundary value problem of the thermal process of bimetalization, in this work we present the preliminary modeling based on the analytical solution of the thermal task of bimetalization

Ключевые слова: АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ, ТЕПЛОВАЯ ЗАДАЧА, ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ, БИМЕТАЛЛ, ПАРА ТРЕНИЯ, ПОД-

Keywords: ANALYTICAL SOLUTION, THERMAL PROBLEM, TEMPERATURE CONTROL, BIMETAL, PAIR OF FRICTION, BEARING, PLATING

ШИПНИК СКОЛЬЖЕНИЯ, ПЛАКИРУЮЩИЙ
СЛОЙ, ЦЕНТРОБЕЖНАЯ БИМЕТАЛЛИЗАЦИЯ,
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА

LAYER, CENTRIFUGAL BIMETALLIZATION,
ELECTRIC ARC

Doi: 10.21515/1990-4665-130-085

В узлах и механизмах различных машин и технологического оборудования применяются подшипники скольжения, в конструкции которых используются дорогостоящие цветные металлы и износостойкие сплавы. Кроме подшипников скольжения, машиностроение также нуждается в качественно и экономично изготовленных деталях пар трения типа гильз для цилиндров буровых насосов и гидромоторов, ходовых гайках передач винт-гайка скольжения, гильзах двигателей внутреннего сгорания и т.п. С целью повышения эксплуатационных характеристик и снижения расхода дорогостоящих материалов эти детали следует изготавливать из биметаллических композиций. Композиции биметаллов могут быть различными: сталь (или чугун) – бронзы различных марок; сталь-сормайт; сталь-сормайт с рэлитом; углеродистая сталь - коррозионностойкая сталь.

Биметаллическое исполнение этих изделий позволяет сэкономить до 75-90% дорогостоящих материалов [1]. Различие физико-механических характеристик слоев обеспечивает биметаллическим деталям свойства недоступные при монометаллическом исполнении: сочетание высокой прочности с хорошей ударной вязкостью, высокой антифрикционности с износостойкостью.

Одним из эффективных способов получения, например, биметаллических втулок является способ центробежной биметаллизации с нагревом независимой электрической дугой – ЦБНД [2]. Этот способ отличают эффективное использование тепловой энергии и высокое качество биметаллических изделий.

Технология ЦБНД предусматривает нагрев вращающейся зашихтованной заготовки сканирующей в ее внутренней полости электрической

дугой до температуры, превышающей точку ликвидус наплавляемого материала. Важной особенностью этой технологии является требование равномерного прогрева заготовки по всей длине до образования сплошного слоя расплава плакирующего материала, что в ряде случаев – при больших длинах и сложной конфигурации заготовки – оказывается достаточно сложной задачей. Кроме того, на заключительной стадии процесса возрастают тепловые потери, которые пропорциональны площади поверхности заготовки.

Расчеты, эксперименты, практика лабораторных и промышленных опытов в области ЦБНД позволили установить, что основные параметры технологического процесса лежат в достаточно узких границах. Так плотность теплового потока на границе раздела слоев обычно составляет 0,5 – 1, 0 МВт/м²; меньшие значения вызывают размыв основы (из-за длительного контакта с расплавом), а большие чреваты выгоранием компонентов шихты и появлением избыточных термических напряжений в теле основы. Линейная скорость вращения на внутренней поверхности основы обычно равна 4 – 6, реже – 2,5 – 3 м/с и соответствует в большинстве случаев частотам вращения, принятым в практике центробежного литья. Конечная температура расплава на 50 – 150 К превышает его точку ликвидуса, причем внутри этого интервала выбор связан как с природой расплава, так и массивной основы.

ЦБНД можно разбить на следующие этапы:

- нагрев шихты, плавление флюсов, гравитационное разделение компонентов шихтового слоя;
- образование расплава, формирование металлической связи на границе с основой, вытеснение офлюсованных окислов на внутреннюю поверхность расплава, а тяжелых частиц – на периферию ванны;
- затвердевание расплава, корки флюсов и окислов; охлаждение заготовки.

Высокотемпературный процесс ЦБНД осуществляется на установках мощностью от 10 до 40 кВт и выше. Стадию нагрева в процессе ЦБНД характеризуют следующие параметры:

- температура на границе основы и наплавляемого слоя;
- время нагрева;
- мощность электрической дуги;
- скорость перемещения электрической дуги;
- неравномерность температурного поля биметаллизируемой заготовки вдоль ее оси;
- теплофизические характеристики наплавляемого слоя и основы;
- размеры основы и наплавляемого слоя;
- условия теплообмена с окружающей средой.

Температурный контроль процесса центробежной биметаллизации с нагревом независимой электрической дугой (ЦБНД) является важнейшей частью технологии, так как температура расплава и основы оказывает значительное влияние на качество биметалла. Брак биметалла получается и при недогреве, и при перегреве. При недогреве наплавляемый слой получается пористым, с раковинами и посторонними включениями. Жидкотекучесть расплава в этом случае так низка, что в зоне контакта с основой не протекают диффузионные процессы [3]. При остывании наплавляемый материал может отслаиваться от основы. Пористость наплавленного слоя увеличивается так же из-за газонасыщения расплава при завышенных конечных температурах нагрева и увеличения продолжительности этой стадии [4]. Насыщение расплава газами тормозится увеличением мощности нагрева, впрочем, это правило сформулировано при плавке больших объемов металла в тиглях установок ТВЧ, электродуговых печах и т.д. [5]. Газонасыщение расплава замедляется также при ускоренном охлаждении [6].

При перегреве интенсифицируются рекристаллизационные процессы, особенно в заготовках из проката или поковок, укрупняется зерно ос-

новы [7]. В основе появляются трещины. Материал основы в зоне контакта с расплавом размывается и проникает в наплавляемый слой [8], легкоплавкие компоненты расплава выгорают.

Тепловые режимы биметаллизации выбираются в зависимости от теплофизических характеристик и размеров конкретной пары: основа - плакирующий слой. Эти режимы должны контролироваться и строго соблюдаться, в противном случае, изготавливаемый биметалл будет некачественным [3]. Кроме того, ЦБНД требует температурного контроля, поскольку при перемещении электрической дуги возможно чередование недогретых и перегретых зон за счет отвода тепла от торцов заготовки в установку и от наружной поверхности заготовки в окружающую среду.

Единственным приемлемым вариантом температурного контроля теплового процесса ЦБНД для промышленных условий является контроль по температуре наружной поверхности стальной основы. Для этого необходимо решить тепловую задачу о связи между температурой на поверхности заготовки и температурой на границе раздела слоев. Так что, задача, поставленная в этой работе, имеет конкретное практическое применение.

Практика биметаллизации показывает, что оптимальная температура плакирующего слоя равна

,

где - температура ликвидуса плакирующего материала.

Но контролировать эту температуру прямыми измерениями в промышленных условиях не предоставляется возможным. Поэтому необходимо установить связь между температурой на границе основа – расплав и температурой наружной поверхности основы.

При определении зависимости температуры на наружной поверхности основы от температуры на границе основа – расплав, т.е. при производстве биметаллов по центробежной технологии есть возможность контролировать температуру на границе расплав-основа, что в промышленных

условиях имеющимися техническими средствами весьма затруднительно и нецелесообразно. Косвенный же контроль вполне реализуем на основе связи температуры внутри заготовки с температурой ее наружной поверхности, которую можно контролировать с помощью, например, оптического пирометра. Кроме того, полученные зависимости пригодны для расчета размеров области, в которой температура превышает эвтектическую или рекристаллизационную.

В работе [9] предложена математическая модель теплового процесса, включающая в себя уравнение теплопроводности Фурье и теплообмен на торцах втулки по закону Ньютона. Тепловая задача осесимметричная, нестационарная, нелинейная. Учитывалось, что контакт биметаллизируемой втулки и фланцев не идеален. Через контактную поверхность теплота передается теплопроводностью, излучением и конвекцией. При формировании граничных условий приняты следующие допущения:

- в зоне контакта торцов втулки с фланцами моделировали теплообмен по закону Ньютона (граничные условия третьего рода) с эквивалентными коэффициентами теплообмена материала основы и наплавляемого слоя с фланцами;

- на границе раздела материала основы и наплавляемого слоя моделировали идеальный контакт (граничные условия четвертого рода);

- наружная поверхность втулки отдает теплоту окружающей среде конвекцией и излучением. Моделировали теплообмен по закону Ньютона (граничные условия третьего рода) с эквивалентным коэффициентом теплообмена.

Эквивалентные коэффициенты теплообмена задавали на основе данных полученных в работах [10, 11, 12, 13] и корректировали сопоставляя расчетные и экспериментальные термограммы. Это весьма трудоемкая работа, требующая значительных временных затрат, например, для опреде-

ления эквивалентных коэффициентов теплообмена и исследования теплофизических характеристик материалов основы и наплавляемого слоя.

С целью минимизации времени отладки краевой задачи теплового процесса ЦБНД был предложен вариант предварительного моделирования на основе аналитического решения тепловой задачи ЦБНД.

Краевая задача, описывающая процесс центробежной биметаллизации с электродуговым нагревом, может быть представлена [14] как сумма задач для ограниченного сплошного стержня и неограниченного полого цилиндра:

$$\frac{\partial^2 \psi_2}{\partial z^2} + \gamma_1^2 \psi_2 = 0, \quad ; \quad (1)$$

$$\left(\lambda_3 \frac{\partial \psi_2}{\partial z} \Big|_{z=+0} - \lambda_4 \frac{\partial \psi_0}{\partial z} \Big|_{z=-0} \right)_{z=0} = 0; \quad (2)$$

$$\left(\lambda_5 \frac{\partial \psi_2}{\partial z} \Big|_{z=+l} + \lambda_6 \frac{\partial \psi_0}{\partial z} \Big|_{z=-l} \right)_{z=l} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \psi_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_1}{\partial r} + \gamma_3^2 \psi_1 = 0, \quad ; \quad (4)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial \psi}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = 0; \quad \left(\lambda_2 \frac{\partial \psi_1}{\partial r} + \alpha_2 \psi_1 \right) \Big|_{r=R_2} = 0, \quad (5)$$

где ψ - обобщенный полином;

Y - корни характеристического уравнения;

λ – коэффициенты теплопроводности на границе раздела основы и наплавляемого материала, на плоскости контакта торцов биметаллизируемой втулки и фланцев, удерживающих втулку на установке, Вт/(м·К);

r – текущий радиус биметаллизируемой втулки, м;

R_1 – внутренний радиус основы, м;

R_2 – наружный радиус основы, м;

z – текущая координата осевого размера биметаллизируемой втулки, м;

l - длина втулки, м;

Решение уравнения (1) с граничными условиями (2) и (3) имеет вид:

$$\psi_{2k}(z) = \frac{\cos k\pi z}{l}; \quad k=0, 1, \dots \quad (6)$$

Система собственных функций (6) ортогональна в области $[0, l]$ с весом $P=1$ и полна. Решением уравнения (4) с граничными условиями (5) является функция

$$\psi_{1k}(r) = Y_1(\mu_k) J_0 \left(\mu_k \frac{r}{R_1} \right) - J_1(\mu_k) Y_0 \left(\mu_k \frac{r}{R_1} \right), \quad (7)$$

где Y_0 – сферическая функция нулевого порядка;

Y_1 - сферическая функция первого порядка;

J_0 - функции Бесселя первого рода;

J_1 - функции Бесселя первого рода;

μ_k – корень трансцендентного характеристического уравнения.

В соответствии с уравнениями (4) определяем, что собственные функции $\psi_{1k}(r)$ ортогональны на $[R_1, R_2]$ относительно весовой функции $P(r) = r$.

Возвращаясь к краевой задаче, описывающей процесс центробежной биметаллизации с электродуговым нагревом, сформулируем ее как дифференциальное уравнение теплопроводности следующим образом:

$$\frac{\partial^2 \psi_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi_3}{\partial z^2} - \gamma_2^2 \psi_3 = 0, \quad R_1 < r < R_2; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & 0; \\ (9) \quad & \left(\lambda_1 \frac{\partial \psi_3}{\partial r} \right)_{r=R_1} = 0; \quad \left(\lambda_2 \frac{\partial \psi_3}{\partial r} + k \psi_3 \right)_{r=R_2} = 0; \end{aligned}$$

$$(10) \quad \left(\lambda_3 \frac{\partial \psi_3}{\partial z} \right)_{z=0} = 0; \quad \left(\lambda_4 \frac{\partial \psi_3}{\partial z} \right)_{z=l} = 0.$$

На основе рассмотренных выше частных задач для ограниченного сплошного стержня (1), (2), (3) и неограниченного полого цилиндра (4), (5) получаем общее решение задачи (8) – (10):

$$\begin{aligned} \psi_{2k}(r, z) &= \psi_{1k}(r) \cdot \psi_{2k}(z) = \\ (11) \quad & \left[\{ Y_1(\mu_k) \cdot J_0 \left(\mu_k \frac{r}{R_1} \right) - J_1(\mu_k) \cdot Y_0 \left(\mu_k \frac{r}{R_1} \right) \right] \cdot \frac{\cos k\pi z}{l}; \quad k=0, 1, \dots \end{aligned}$$

$$\gamma_{3k}^2 = \gamma_{1k}^2 + \gamma_{2k}^2 = \left(\frac{\mu_k}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{k\pi}{l}\right)^2. \quad (12)$$

Полученное аналитическое решение может быть использовано для постановки и отладки краевой задачи теплового процесса ЦБНД с последующим ее решением численными методами средствами вычислительной техники.

Результаты этих расчетов совпадают с данными натурной термометрии с точностью 10-14% в диапазоне температур 1100 – 1450 К. При понижении температуры точность повышается до 7 %.

Важным этапом процесса ЦБНД также является процесс охлаждения. Процесс охлаждения в работе [13] исследован на примере неограниченного биметаллического цилиндра. Учитывалось, что при затвердевании расплава при дуговой биметаллизации между слоями устанавливается идеальный тепловой контакт, температурное поле (гладкое и непрерывное) формируется на стадии нагрева, толщина наплавляемого слоя – не более 4-5 мм. Для решения задачи охлаждения были использованы те же нелинейные уравнения теплопроводности, что и на стадии нагрева, но на нисходящей ветви термического цикла менялись граничные условия.

При выборе режима охлаждения необходимо учитывать, что быстрое охлаждение способствует образованию мелкодисперсной структуры, которая характеризуется высокими механическими свойствами. Но при быстром охлаждении образуются также трещины в наплавляемом и в основном слоях, отслаивается наплавленный слой, что обусловлено разницей в коэффициентах термического расширения материалов.

Литература

1. Гарбуз Н.А. Металлические композиционные материалы//Труды/ Краснодар. политехн. ин-т. – Краснодар, 1977.- вып. 251. – С.3-8.
2. Денисенко С.Г., Глушко С.П. Оптимизация технологии производства подшипников скольжения из биметалла сталь-бронза//Современные методы наплавки,

упрочняющие защитные покрытия и используемые материалы: Тез. докл. Украинск. Респ. науч.-техн. конф. – Харьков, 1990. – С. 70-71.

3. Гарбуз Н.А., Рудаков Е.А., Киприянова В.Н., Сапожников С.З. исследование, разработка и внедрение биметаллов// Новые исследования в машиностроении и металлообработке.- Краснодар, 1982. – С. 10-14.

4. Гарбуз Н.А., Сапожников С.З., Глушко С.П. Температурное поле заготовки при центробежной биметаллизации с нагревом независимой электрической дугой// Новые технологии производства слоистых металлов, перспективы расширения из сортамента и применения: Тез. докл. науч.- техн. сем. - Магнитогорск, 1987. – С. 13-14.

5. Туркдоган Е.Т. Физическая химия высокотемпературных процессов: Пер. с англ. – М.: Metallurgija, 1985. – 344 с.

6. Пржибыл И. Теория литейных процессов (основные вопросы теории и примеры приложений)/Пер. с чеш. – М.: Мир, 1967. – 328 с.

7. Бутковский А.Г., Малыт С.А., Андреев Ю.Н. Оптимальное управление нагревом металла. – М.: Metallurgija, 1972. – 440 с.

8. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.

9. Глушко С.П. Моделирование теплового процесса центробежной биметаллизации внутренней поверхности втулок/ С.П. Глушко, Д.Л. Поправка, Н.С. Абрамов// Сварочное производство. – 2009. - №2. – С. 30-35.

10. Карножицкий В.Н. Контактный теплообмен в процессах литья. - Киев: Наукова думка, 1978. – 300 с.

11. Самойлович Ю.А. Системный анализ кристаллизации слитка. - Киев: Наукова думка, 1983. – 248 с.

12. Шмрга Л. Затвердевание и кристаллизация стальных слитков: Пер. с чеш. М.: Metallurgija, 1985. – 248 с.

13. Сапожников С.З. Разработка и внедрение технологии производства биметаллических заготовок методом совместного нагрева. Автореф. дис. ...д-ра техн. наук. Свердловск, 1988. – 54 с.

14. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа, 1985. – 480 с.

References

1. Garbuz N.A. Metallicheskie kompozicionnye materialy//Trudy/ Krasnodar. politehn. in-t. – Krasnodar, 1977.- vyp. 251. – S.3-8.

2. Denisenko S.G., Glushko S.P. Optimizacija tehnologii proizvodstva pod-shipnikov skol'zhenija iz bimetalla stal'-bronzа//Sovremennye metody naplavki, up-rochnjajushhie zashhitnye pokrytija i ispol'zuemye materialy: Tez. dokl. Ukrainsk. Resp. nauch.-tehn. konf. – Har'kov, 1990. – S. 70-71.

3. Garbuz N.A., Rudakov E.A., Kiprijanova V.N., Sapozhnikov S.Z. issledovanie, razrabotka i vnedrenie bimetallov// Novye issledovanija v mashinostroenii i metal-loobrabotke.- Krasnodar, 1982. – S. 10-14.

4. Garbuz N.A., Sapozhnikov S.Z., Glushko S.P. Temperaturnoe pole zagotovki pri centrobezhnoj bimetallizacii s nagrevom nezavisimoj jelektricheskoj dugoj// No-vye tehnologii proizvodstva sloistyh metallov, perspektivy rasshirenija iz sorta-menta i primeneni-ja: Tez. dokl. nauch.- tehn. sem. - Magnitogorsk, 1987. – S. 13-14.

5. Turkdogan E.T. Fizicheskaja himija vysokotemperaturnyh processov: Per. s angl. – М.: Metallurgija, 1985. – 344 с.

6. Przhibyl I. Teorija litejnyh processov (osnovnye voprosy teorii i prime-ry prilozhenij)/Per. s chesh. – M.: Mir, 1967. – 328 s.
7. Butkovskij A.G., Malyt S.A., Andreev Ju.N. Optimal'noe upravlenie nagre-vom metalla. – M.: Metallurgija, 1972. – 440 s.
8. Rykalin N.N. Rachety teplovyh processov pri svarke. – M.: Mashgiz, 1951. – 296 s.
9. Glushko S.P. Modelirovanie teplovogo processa centrobeznoj bimetal-lizacii vnu-trennej poverhnosti vtulok/ S.P. Glushko, D.L. Popravka, N.S. Abramov// Sva-rochnoe pro-izvodstvo. – 2009. - №2. – S. 30-35.
10. Karnozhickij V.N. Kontaktnyj teploobmen v processah lit'ja. - Kiev: Nau-kova dumka, 1978. – 300 s.
11. Samojlovich Ju.A. Sistemnyj analiz kristallizacii slitka. - Kiev: Nauko-va dumka, 1983. – 248 s.
12. Shmrga L. Zatverdevanie i kristallizacija stal'nyh slitkov: Per. s chesh. M.: Metal-lurgija, 1985. – 248 s.
13. Sapozhnikov S.Z. Razrabotka i vnedrenie tehnologii proizvodstva bimetal-licheskih zagotovok metodom sovmestnogo nagreva. Avtoref. dis. ...d-ra tehn. nauk. Sverd-lovsk, 1988. – 54 s.
14. Kartashov Je.M. Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdyh tel. M.: Vysshaja shkola, 1985. – 480 s.