
НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 539.3,621.7

**РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА
“МАТЕРИАЛ–ПОКРЫТИЕ” ОТ БЫСТРОДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА
ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКЕ****© 2019 г. Х. А. Дианов¹, А. А. Локтев^{1,*}, А. В. Людаговский¹, В. А. Полухин¹,
В. Г. Дмитриев², Г. В. Москвитин³**¹ *Российский университет транспорта, Москва, Россия*² *Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),
Москва, Россия*³ *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия***e-mail: aaloktev@yandex.ru*

Поступила в редакцию 22.11.2017 г.

Принята к публикации 28.02.2019 г.

При моделировании процесса наплавки предлагается представить источник тепло-выделения в виде системы мгновенных точечных источников, которые вспыхивают и гаснут в течение некоторого времени, а период времени между вспышками стремится к нулю. Итоговые результаты распределения температуры определяются путем суммирования одиночных воздействий по предлагаемой расчетной схеме. Полученные графические и аналитические зависимости позволяют представить в первом приближении величину и интенсивность температурных полей в рабочей зоне при электромагнитной наплавке заготовок больших размеров с достаточным теплоотводом от восстанавливаемых поверхностей. Предложенную методику можно использовать при ремонте и модернизации элементов железнодорожного подвижного состава.

Ключевые слова: восстанавливаемая деталь, полосовой источник нагрева, распределение температуры, плотность теплового потока, скорость движения источника

DOI: 10.1134/S0235711919030039

В настоящее время на предприятиях различных отраслей промышленности накоплен большой опыт применения наплавки и сварки в процессе изготовления и ремонта оборудования различного назначения. Наблюдается тенденция роста применения автоматизированной и механизированной сварки и наплавки. Настоящая статья посвящена изучению распределения температур на границе раздела “материал–покрытие” от быстро движущегося источника тепловыделения при электромагнитной наплавке, которая сопровождается процессами двух типов. Физико-химические процессы при наплавке активируются в жидкой фазе, продолжают вплоть до полного остывания и характеризуются структурными и фазовыми превращениями в наплавляемом слое и в приповерхностном слое наплавляемой детали. Термодеформационные процессы реализуются в виде упругопластического деформирования металла основы при неравномерном нагреве в процессе наплавки и охлаждении ниже температур солидуса и возникновения остаточных термических напряжений. Превращения в металлах при термодеформационных процессах определяют технологическую прочность зоны термического влияния и наплавленного слоя, а это значит стойкость против образова-

ния локальных разрушений в процессе наплавки прочности связи на границе раздела [1–4].

Метод электромагнитной наплавки основан на использовании энергии магнитного поля, выступающей в качестве связки зерен порошка на основе, находящихся в подвижно связанном и скоординированном состоянии относительно обрабатываемой поверхности, и электрической, расплавляющей зерна порошка и микрогребешки восстанавливаемой или упрочняемой поверхности [5, 6]. При этом заготовка располагается на некотором расстоянии от полюсного наконечника сердечника электромагнитной катушки. Сердечник и заготовка подключаются к источнику электрического тока. В зазор между обрабатываемой поверхностью и полюсным наконечником подается порошок, который обладает магнитными свойствами, его частицы выстраиваются вдоль силовых линий магнитного поля и замыкают электрическую цепь “деталь–наконечник”. Зерна порошка под действием энергии проходящего по ним тока нагреваются, расплавляются и капли расплава порошка переносятся на обрабатываемую поверхность вращающейся детали.

Вид, интенсивность и характер преобразования вводимой энергии определяют условия нанесения покрытия [7], так как без этого невозможна активация соединения расплавленного порошка с поверхностью обрабатываемой детали [8–10]. Вводимый порошок обеспечивает формирование покрытия на восстанавливаемой или упрочняемой поверхности с заданными физико-химическими и механическими свойствами [11, 12].

При электромагнитной наплавке характер переноса расплава порошка в рабочей зоне на обрабатываемую поверхность зависит от многих факторов. Однако энергия электрического и магнитного полей и пути ее преобразования — доминирующие факторы, определяющие характер метода нанесения покрытия как физико-химического явления. Следовательно, с учетом термодинамики метод электромагнитной наплавки — это процесс восстановления и (или) упрочнения детали в постоянном магнитном поле путем монолитного соединения расплавленного порошка с материалом детали в результате введения и термодинамического необратимого преобразования энергии и вещества в месте нанесения покрытия. Монолитность соединения обеспечивается появлением атомно-молекулярных связей между элементарными частицами соединяемых веществ.

При электромагнитной наплавке в процессе нанесения покрытия в рабочей зоне энергией магнитного поля формируется многоэлектродная система, в которой цепочки зерен порошка хаотически контактируют с обрабатываемой поверхностью. Плавление цепочек-электродов происходит дискретно за счет периодического возникновения дугового разряда на каждом из них. При этом поверхность металла основы также частично подвергается расплавлению, вследствие чего происходит диффузия в поверхностном слое обрабатываемой детали и возникают диффузионные зоны сцепления покрытия с основой. Процесс сопровождается протеканием агрегатных превращений в наносимом материале и частично в основе. Импульсный характер подвода энергии сближает электромагнитную наплавку с вибродуговой наплавкой и электроискровым легированием. Формирование импульсов при ЭМН осуществляется как при вибродуговой наплавке, в отличие от электрического, применяемого при электроискровом легировании.

Таким образом, основываясь на том, что при электромагнитной наплавке основную роль — нагрев и плавление присадочного материала — выполняет энергия электрического поля, а вспомогательную — удержание порошка и формирование цепочек-электродов в рабочей зоне — энергия магнитного поля, метод нанесения покрытия из материала ферропорошка импульсами разрядного тока в магнитном поле назван электромагнитной наплавкой.

Для реализации процесса электромагнитной наплавки создаются установки с двух- полюсной и однополюсной магнитными системами. Первая обеспечивает более высокую стабильность и производительность наплавки, вторая и третья — обладают большей универсальностью. При электромагнитной наплавке можно применять широкую гамму порошковых материалов, что позволяет изменять и прогнозировать механические, термические, электрические и другие свойства рабочих поверхностей деталей.

Требования к порошковым материалам вытекают из сущности и целей технологического процесса, материал порошка должен: иметь хорошие магнитные свойства и невысокую температуру плавления, обеспечивающие устойчивость процесса наплавки; обладать небольшим разбросом по грануляции для получения качественного покрытия; иметь хорошую текучесть для равномерной транспортировки в зону наплавки; обеспечивать достаточную плотность покрытия, равномерность структуры, хорошую адгезию с основой и не образовывать трещин при формообразовании; формировать покрытие с требуемыми физико-механическими свойствами.

Распределение температур в системе “покрытие—основа” один из основных факторов, влияющих на формирование физико-химических и эксплуатационных свойств покрытий [5, 6]. При электромагнитной наплавке энергия электрических разрядов не только расплавляет зерна порошка, но и повышает температуру поверхности основы в зоне наплавки [5–8].

Математические модели тепловых процессов электромагнитной наплавки [9, 10] основаны на уравнениях теплопроводности, учитывающих различие теплофизических свойств покрытия и основы [11, 12], а также граничные условия, отражающие особенности метода [13, 14].

Разработка методики расчета распределения температуры при электромагнитной наплавке актуальна как с точки зрения общих основ технологии конструкционных материалов, так и с точки зрения прикладных задач восстановления отдельных металлических элементов для повышения срока службы узлов и агрегатов машин и механизмов. Предлагаемые решения можно использовать при ремонте и модернизации железнодорожных транспортных средств, что очень своевременно, учитывая старение и износ парка тягового и нетягового подвижного состава.

Постановка задачи. Для расчета температурных полей при электромагнитной наплавке в покрытии и основе реальный дискретный процесс принимается непрерывным [15, 16], т.е. некоторое определенное температурное поле в покрытии и основе будет соответствовать каждому моменту времени технологического процесса.

В процессе наплавки дуговой разряд возникает и развивается у поверхности заготовки, где формируются максимальные температуры и тепловые потоки. Поэтому процесс электромагнитной наплавки, в первом приближении, можно описать граничными условиями первого и второго рода и принять квазистационарным [17], т.е. каждая точка в квазистационарном поле соответствует семейству точек нагреваемого тела одинаково расположенных относительно движущегося источника в разные моменты времени [18, 19], а тепловой поток, поступающий в покрытие, полностью отнести к разогреву основы [5].

Определение температурных полей, которые возникают под действием источника сложной формы, можно получить методом суперпозиции (наложения полей) возникающим под действием каждого из мгновенных источников [20], или так называемому методу источников с применением принципа наложения [1–4]. Для описания температурного поля, возникающего под действием мгновенного источника, предлагаем использовать выражение

$$T(x, y, z, \tau) = \frac{q_i}{\lambda \sqrt{\omega(4\pi\tau)^{3/2}}} \exp(-R^2/4\omega\tau) = QF\{R, \tau\}, \quad (1)$$

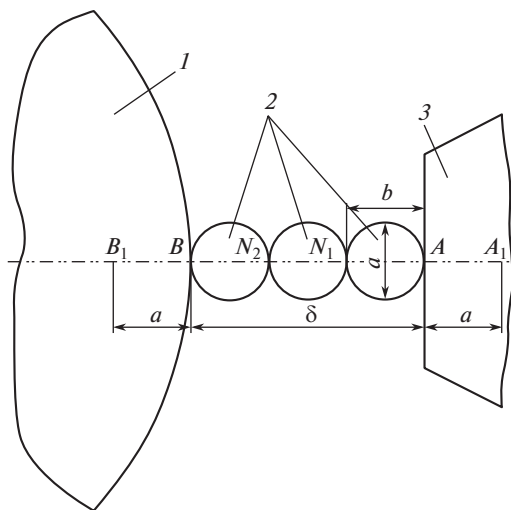


Рис. 1. Расчетная схема нагрева цепочки – микроэлектрода (1 – заготовка; 2 – зерна ферропорошка; 3 – полюсный наконечник).

где q_i – количество теплоты, внесенной источником в тело заготовки, т.е. интенсивность источника; λ – коэффициент теплопроводности; ω – коэффициент температуропроводности; τ – время, прошедшее от момента теплового импульса; R – расстояние от места вспышки $J(x_u, y_u, z_u)$ до какой-либо точки тела $M(x, y, z, t)$:

$$R = \sqrt{(x - x_u)^2 + (y - y_u)^2 + (z - z_u)^2}$$

Метод решения. Для того чтобы перейти к исследуемым случаям, рассмотрим работу точечного источника в виде цепочки – микроэлектрода при процессе электромагнитной наплавки [5].

Согласно теории термической ионизации, возбуждение и развитие электрического дугового разряда, происходит в месте выделения наибольшего количества теплоты, в системе “токопроводящий наконечник–микроэлектрод (дискретные частицы ферропорошка)–деталь”. Микроэлектрод на участке между заготовкой и токопроводящим наконечником нагревается протекающим током. В месте выделения наибольшего количества теплоты происходит перегорание цепочки микроэлектрода и возникновение дугового разряда [21]. Микроэлектрод, в свою очередь, состоит из дискретных частиц ферропорошка, между которыми существуют дополнительные контактные сопротивления.

На рис. 1 представлена расчетная схема нагрева цепочки – микроэлектрода и приняты следующие обозначения: 1 – заготовка; 2 – зерна ферропорошка; 3 – полюсный наконечник.

Рассматривая нагрев цепочки-электрода (рис. 1), заметим, что в окрестности точки A, контакта ферропорошка с полюсным наконечником, часть выделяющейся энергии, определяющейся коэффициентом $0 < K < 1$, поступает к первым зернам электрода, а остальная расходуется на разогрев полюсного наконечника. Так как время импульса составляет 0.01, ..., 0.15 с [3], то потерями на конвекцию и излучение можно пренебречь.

Принимая, что для полюсного наконечника нагреваемая область вокруг точки A ограничивается цилиндрическим объемом металла длиной a до точки A₁, равным наибольшей поперечной площади зерен (рис. 1).

Анализ распределения температуры по длине цепочки-микроэлектрода показывает, что при коротком замыкании происходит ее неравномерный нагрев. При распределении температуры наблюдается ряд температурных максимумов: у полюсного наконечника, в местах контакта зерен ферропорошка, у поверхности обрабатываемой заготовки. Возбуждение и развитие электрической дуги объясняется тем, что благодаря высокой плотности тока температура контакта сильно возрастает, металл зерен расплавляется и частично испаряется, образуя промежуток, заполненный парами металла, потенциал которых ниже потенциала ионизации воздуха.

Ввиду малого расстояния между электродами и высокой степени ионизации развивается дуговой разряд [2], следовательно, место возникновения и протекания электрического разряда определяется расположением температурного максимума.

Анализ изменений температуры [5] по длине цепочки—электрода в зависимости от условий электромагнитной наплавки показывает, что расположение температурного максимума зависит в основном от перераспределения теплоты в контакте полюсный наконечник — ферропорошок. При коэффициенте распределения энергии $K > 0.7$ температурный пик находится в точке A (рис. 1) и электрический разряд развивается у поверхности полюсного наконечника, где процесс наплавки на обрабатываемую поверхность не происходит. При $K = 0.7$ температурный пик определяется контактными сопротивлениями ферропорошка, при $K < 0.7$ он расположен у обрабатываемой поверхности. В последнем случае наблюдается устойчивый перенос расплава материала порошка на обрабатываемую поверхность изделия.

Далее рассмотрим температурное поле, полученное от трехмерного (объемного) источника теплоты. Поскольку точечный источник не может иметь конфигурации, ограничения, закона распределения плотности по любой из осей, а решение (1) получено в предположении, что источник неподвижный, действует весьма короткое время и при $R \rightarrow \infty$ температура $t_s \rightarrow 0$ (граничное условие первого рода). Выражение (1) является так называемым фундаментальным решением упрощенного дифференциального уравнения теплопроводности, описывающего в самом общем виде температурное поле, возникающее в твердом теле под действием внешних и внутренних источников теплоты [1]. Особенностью предлагаемого метода определения параметров распределения температуры по обрабатываемой детали является учет волновых эффектов по примеру работы [15], что в итоге позволит учесть различный тип источника теплоты, а также скорости его движения.

Чтобы описать с помощью формулы (1) температурные поля возникающие под действием различных источников теплоты, в зависимости от поставленной задачи, совершают интегральные переходы от точечного к двух или трехмерному, от мгновенного к непрерывно действующему и от мгновенного к движущемуся [6].

В исследуемом случае определение тепловых полей заготовки при принятых допущениях можно получить последовательным суммированием уравнения (1). Тогда дифференциальное уравнение теплопроводности представляется в виде

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y \partial x} \frac{\partial y \partial x}{\partial x} = \frac{2q_{об}\omega \exp\{-x^2/[4\alpha(y_i - y)]\}}{\lambda\sqrt{4\pi\alpha(y_i - y)}}, \quad (2)$$

где $q_{об}$ — плотность теплового потока на единицу объема; ω — коэффициент температуропроводности; λ — коэффициент теплопроводности; y_i — рассматриваемая точка на поверхности заготовки.

Интегрирование отображает суперпозицию элементарных температур. Суперпозиция возможна только тогда, когда теплофизические характеристики материала приняты не зависящими от температуры. На рис. 2 представлена схема воздействия объемного источника тепловыделения на заготовку.

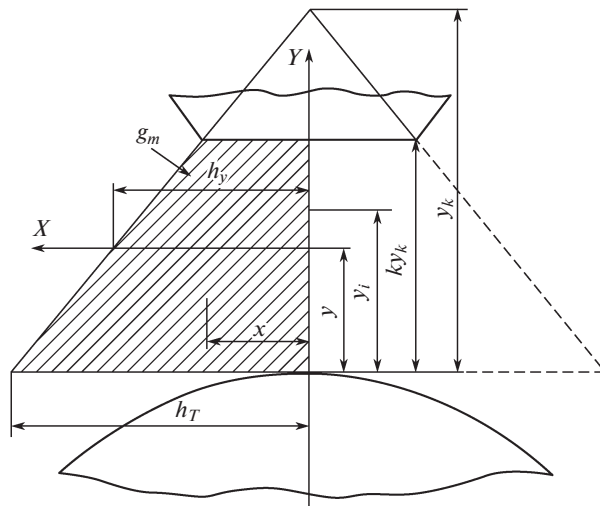


Рис. 2. Схема температурных полей от объемного источника тепловыделения.

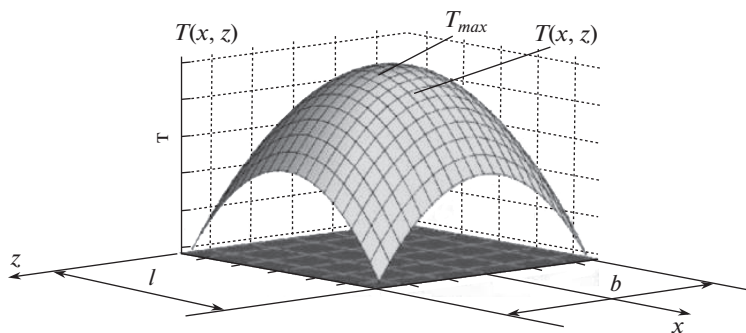


Рис. 3. Распределение температуры для непрерывно действующего двумерного источника теплоты.

Суммирование уравнения (2) в соответствии с расчетной схемой (рис. 2) при равномерно распределенной интенсивности тепловыделения q_T по всему объему с габаритными размерами h_T и ky_k дает соотношение

$$T_s = \frac{2q_m(2-k)y}{q_m\lambda} \int_0^{y_i} \frac{y_k}{y_k - y} dy \int_0^{y_i} \frac{\exp\{-x^2/[4\omega(y_i - y)]\}}{\sqrt{4\pi\omega(y_i - y)}} dz + \quad (3)$$

$$+ \frac{2q_m\omega}{\lambda} \int_0^{y_i} \frac{(y_k - y) \exp\{-z^2/[4\omega(y_i - y)]\}}{y_k \sqrt{4\pi\omega(y_i - y)}} dy.$$

Для процесса электромагнитной наплавки (ЭМН) плотность теплового потока определяется зависимостью

$$q_T = \eta_3 UI \tau \nu_p,$$

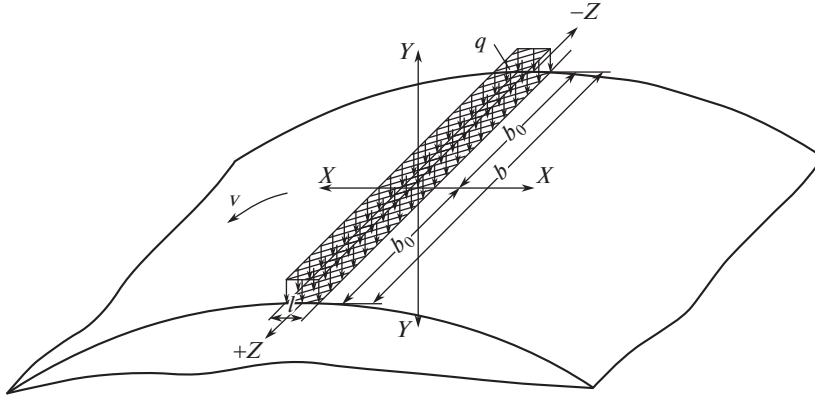


Рис. 4. Схема воздействия полосового быстродвижущегося источника тепловыделения на заготовку.

где η_3 – эффективный КПД электрической дуги; U – напряжение, В; I – сила тока, А; τ – время дугового разряда, с; v_p – плотность возникновения дуговых разрядов, $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$.

На рис. 3 показано распределение температуры для непрерывно действующего двумерного источника теплоты. В случае варианта ЭМН, когда размер трехмерного (объемного) источника в направлении одной из осей координат намного меньше размеров в других направлениях где, $q_m \rightarrow 0$ тогда источник можно полагать двумерным и можно использовать соотношение

$$T_s = \frac{2q_{m0}}{\lambda} \int_0^{y_i} \frac{(y_k - y)}{y_k \sqrt{4\pi\omega(y_i - y)}} dy. \quad (4)$$

Выполненные расчеты в системе Mathcad формул (3) и (4) показывают, что температуры, полученные с учетом трехмерного (объемного) источника тепловыделения, ниже двумерного примерно на 10%.

Это означает, что источник тепла при электромагнитной наплавке, движущийся со скоростью v , можно принять полосовым, шириной l или даже линейным, распределенным вдоль направления подачи X полюсного наконечника. Протяженность воздействия источника на поверхность будет равна $2b_0$ – ширине, или шагу наплавки за один проход. На рис. 4 показана схема воздействия полосового быстродвижущегося источника тепловыделения на заготовку.

Для моделирования такого источника можно в первом приближении рассмотреть зависимость, описывающую процесс распространения тепла от точечного источника быстродвижущегося по полупространству с границей [1]

$$T_i = \frac{q_i}{2\pi\lambda(x - x_n)} \exp \left\{ -\frac{v_n[(z - z_n)^2 + y^2]}{4\alpha(x - x_n)} \right\}, \quad (5)$$

где $z_i, 0, x_i$, – координаты точечного источника; q_i – его интенсивность.

Чтобы рассчитать температуру, которая возникает в точке с координатами x, y, z под действием бесконечно большого количества точечных источников, образующих плоский источник $2b_0l$, проинтегрируем зависимость (5) по z_n и x_n [1]. Интегрирование от $z_n = -b_0$ до $z_n = 1$ позволяет получить температурное поле в детали для полосового

вого быстродвижущегося источника, которое описывается аналитическим выражением

$$T(x, y) = \frac{q\sqrt{\omega_d}}{2\lambda\sqrt{\pi\nu}} \int_0^{b_0} \frac{dx_u}{\sqrt{x - x_u}} \exp\left[-\frac{\nu y^2}{4\omega(x - x_u)}\right], \quad (6)$$

где x_u — абсцисса импульса теплоты; (x, y) — абсцисса и ордината точки, для которой рассчитывается температура; $b_0 = l$, если $x \geq l$, $b_0 = l/2$, если $x < l$.

Результаты исследования. В ходе исследования был проанализирован рынок железнодорожных кранов и наиболее часто изнашиваемые ответственные детали к ним. Одними из таких деталей являются валы. Для восстановления их изношенных поверхностей с учетом экономической целесообразности по сравнению с изготовлением новых деталей, оптимально подходит метод электромагнитной наплавки. Затраты на материалы и количество технологических операций при этом сокращается в несколько раз, что способствует экономии металла, топливно-энергетических и других ресурсов.

Для электромагнитной наплавки валов представляют интерес сплавы системы железо—ванадий. Ванадий, как и титан, образует с железом непрерывный ряд твердых растворов, замыкая границу существования $\alpha + \gamma$ и γ -фаз примерно при 1% ванадия. Следовательно, сплавы Fe—V обладают высокими магнитными свойствами. При быстром охлаждении пересыщенного ванадием твердого раствора образуется мартенсит, твердость которого определяется концентрацией ванадия в сплаве.

Наибольшей износостойкостью обладают покрытия из порошков быстрорежущих сталей Р6М5Ф3 и Р6М5К5, а также ферробора ФБ-3 и сплава С-300. Износостойкость этих покрытий значительно выше износостойкости эталона (сталь 45). Она в 1.72—2.11 раза больше для электромагнитной наплавки.

Для расчета на ЭВМ температур в поверхностном слое заготовок в процессе электромагнитной наплавки необходимо знать теплофизические свойства материала покрытия и основы. Основа (заготовка) чаще всего является компактным материалом, и его свойства изучены и широко представлены в справочной литературе. Для покрытий выбор значений теплофизических и механических свойств затруднен, так как они в значительной мере зависят от компонентов материала покрытий, метода и условий их нанесения. Исходя из того, что покрытия, полученные электромагнитной наплавкой, имеют монолитное соединение с основой и зависят от химического состава наплавляемого порошка, можно принять значения требуемых теплофизических характеристик как для соответствующих стандартных сплавов, используемых в качестве материала покрытия.

Метод электромагнитной наплавки реализуется при различных источниках разрядного тока, но выбор его имеет большое значение, так как производительность наплавки, напрямую зависит от параметров электрических импульсов. Наибольшее применение в производстве нашли сварочные выпрямители ВД-401, которые позволяют регулировать силу разрядного тока в пределах 60—500 А.

Результаты оптимизации технологических факторов электромагнитной наплавки [21], показывают, что оптимальные режимы для различных порошков имеют незначительные отличия, а по некоторым технологическим факторам практически совпадают, поэтому для электромагнитной наплавки различных по химическому составу порошков рекомендован следующий режим: $i = 2.1\text{--}2.4 \text{ А/мм}^2$ — плотность разрядного тока, $B = 0.75\text{--}1.00 \text{ Т}$ — магнитная индукция в рабочем зазоре, $\delta/\Delta = 8.0\text{--}8.8$ — соотношение, определяющее количество зерен порошка образующих цепочку с электродом, δ — характерный рабочий зазор, Δ — зернистость порошка, $g = (2.7\text{--}3.2) \times 10^{-3} \text{ г(с} \cdot \text{мм}^2)$ — расход порошка, $\tau = 0.35\text{--}0.45$ — удельная длительность процесса. Толщина наплавки при таком методе рациональна до 500 мкм.

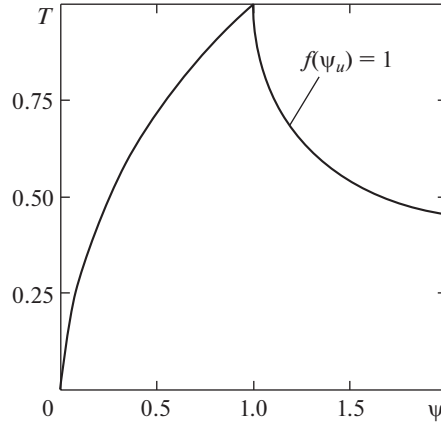


Рис. 5. Распределение безразмерной температуры на поверхности детали.

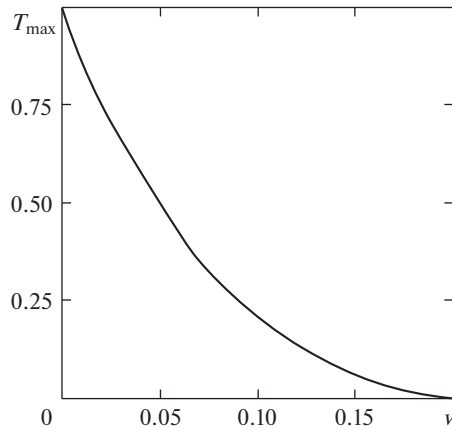


Рис. 6. Распределение безразмерной температуры по глубине детали.

Для исследования температурного поля в детали целесообразно перейти к безразмерным величинам $\psi = x/l$; $\psi_u = x_u/l$; $\nu = y/l$,

$$T(x, y) = \frac{ql}{\lambda_d \sqrt{\pi} \sqrt{P_e}} T(\psi, \nu); \quad T(\psi, \nu) = \frac{1}{2} \int_0^{\Delta} \frac{f(\psi_u) d\psi_u}{\sqrt{\psi - \psi_u}} \exp \left[-\frac{P_e}{4} \frac{\nu^2}{\psi - \psi_u} \right], \quad (7)$$

где $P_e = \nu l / \omega_d$ – критерий Пекле; $T(\psi, \nu)$ – безразмерное распределение температур; Δ – верхний предел интеграла: $\Delta = \psi$ при $0 \leq \psi \leq 1$ и $\Delta = 1$ при $\psi > 1$; $f(\psi_u)$ – закон распределения плотности теплового потока.

Распределение безразмерных температур на поверхности детали $T(\psi)$ (координата $\nu = 0$) и по глубине детали $T(\nu)$ (координата $\psi = 1$) имеют вид

$$T(\psi) = \frac{1}{2} \int_0^{\Delta} \frac{f(\psi_u) d\psi_u}{\sqrt{\psi - \psi_u}}; \quad T(\nu) = \frac{1}{2} \int_0^{\Delta} \frac{f(\psi_u) d\psi_u}{\sqrt{\psi - \psi_u}} \exp \left[-\frac{P_e}{4} \frac{\nu^2}{1 - \psi_u} \right]. \quad (8)$$

График распределения безразмерной температуры на поверхности заготовки при $v = 0$ для равномерного закона распределения плотности теплового потока представлены на рис. 5. Установлены координаты точек на поверхности детали, имеющие максимальную температуру: для равномерного закона распределения плотности теплового потока с функцией распределения $f(\psi_u) = 1$ безразмерная функция имеет наибольшее значение $T_{\max}(1, 0) = 1$ при $\psi = 1$ и $v = 0$.

Распределение максимальной безразмерной температуры по глубине детали $T_{\max}(\psi, v)$, при значениях ψ , обеспечивающих этот максимум, представлено на рис. 6. График свидетельствует о том, что температура по глубине поверхности достаточно быстро убывает и независимо от закона распределения уже при $v = 0$ становится практически равной нулю. Полученная графическая зависимость позволяет подобрать скорость движения источника тепла, исходя из глубины проплавления материала заготовки и толщины наплавляемого слоя.

Выводы. Полученные зависимости позволяют рассмотреть в первом приближении величину и интенсивность температурных полей в рабочей зоне при электромагнитной наплавке заготовок больших размеров с достаточным теплоотводом от восстанавливаемых поверхностей. Уменьшение количества теплоты, выделяющегося у полюсного наконечника, создание условий для возникновения и развития дугового разряда у поверхности обрабатываемой заготовки позволяет повысить равномерность и производительность нанесения покрытия на обрабатываемой детали. Абсолютные значения температуры, полученные с учетом объемного источника тепловыделения, ниже двумерного примерно на 10%, распределение максимальной безразмерной температуры по поверхности и глубине свидетельствуют о том, что температура по глубине поверхности достаточно быстро убывает независимо от закона распределения и при $v = 0$ становится практически равной нулю.

Предложенная модель тепловых процессов при электромагнитной наплавке позволяет учитывать скорость движения источника тепла и представляется актуальной и своевременной для использования предприятиями транспорта и машиностроения при ремонте валов в условиях сокращения временных интервалов в технологических процессах.

Конфликт интересов: Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 228 с.
2. Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. М.: Машиностроение, 1989. 264 с.
3. Александров Б.П. Исследование электроимпульсного способа нанесения твердых износостойких покрытий применительно к восстановлению автотракторных деталей: Автореф. дисс. ...канд. техн. наук. Л.—Пушкин: ЛСХИ, 1976. 22 с.
4. Хакимов А.Н. Электрошлаковая сварка с регулированием термических циклов. М.: Машиностроение, 1984. 22 с.
5. Горохова М.Н., Полищук С.Д., Богурин А.Н., Бышов Д.Н., Абрамов Ю.Н., Горохов А.Х. Нанесение износостойких покрытий электромагнитной наплавкой // Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, 2012. 178 с.
6. Резников А.Н., Резников Л.А. Основы расчета тепловых процессов в технологических системах: Учебн. пособие. Куйбышев: КуАИ, 1981. 279 с.
7. Погодаев Л.И., Донских Д.Ф., Ежов Ю.Е. Способы повышения надежности шарнирного соединения черпаковой цепи дноуглубительных снарядов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 6. С. 42–48.
8. Бирюков В.П., Дозоров А.В. Лазерные системы для упрочнения, наплавки деталей и точного раскроя листового материала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 1. С. 60–66.

9. Бирюков В.П., Лаптева В.Г., Хренникова И.А., Татаркин Д.Ю. Восстановление лазерной наплавкой работоспособности пары трения “вал–вкладыш” подшипника скольжения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 5. С. 91–95.
10. Погодаев Л.И., Ежов Ю.Е. Повышение долговечности рабочих устройств судов технического флота износостойкими наплавками // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 6. С. 82–87.
11. Бирюков В.П., Татаркин Д.Ю., Хриптович Е.В., Фишков А.А. Определение влияния режимов лазерной наплавки и состава порошковых материалов на износостойкость покрытий // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 1. С. 63–66.
12. Москвитин Г.В., Краснощеков Н.Н. Космическое машиностроение // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 6. С. 3–9.
13. Локтев А.А., Матасов С.А. Определение характеристик электромагнитного поля с помощью лучевого метода // Т-сomm. Телекоммуникации и транспорт. Т. 7. № 3. 2013. С. 28–31.
14. Локтев А.А. Удар вязкоупругого тела по упругой изотропной пластинке // Механика композиционных материалов и конструкций. 2007. Т. 13. № 3. С. 170–178.
15. Локтев А.А. Динамический контакт ударника и упругой ортотропной пластинки при наличии распространяющихся термоупругих волн // Прикладная математика и механика. 2008. Т. 72. В. 4. С. 652–658.
16. Локтев А.А. Ударное взаимодействие твердого тела и упругой ортотропной пластинки // Механика композиционных материалов и конструкций. 2005. Т. 11. № 4. С. 478–492.
17. Локтев А.А. Упругопластическая модель взаимодействия цилиндрического ударника и пластинки // Письма в Журнал технической физики. 2007. Т. 33. № 16. С. 72–77.
18. Барковский Ю.Б., Горохова М.Н., Ретюнских В.Н. Электромагнитная наплавка и поверхностное пластическое деформирование // Технология металлов. 2007. № 12. С. 34–36.
19. Loktev A.A., Loktev D.A. Transverse impact of a ball on a sphere with allowance for waves in the target // Technical Physics Letters. 2008. V. 34. № 11. P. 960–963.
20. Бышов Д.Н., Чурилов Д.Г., Горохов А.А. Методы нанесения металлопокрытий электромагнитной наплавкой // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева, 2012. № 3 (15). С. 66–68.
21. Кожуро Л.М., Хейфец М.Л., Грецкий Н.Л. Теплофизические процессы при нанесении покрытий ферромагнитными порошками в электромагнитном поле // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С: Фундаментальные науки. 2007. № 9. С. 64–70.