

Loza A. V., Rassokhin D. A., Tkachuk K. V., Shishkin V. V.

APPLICATION OF STRAIN REDUCERS ON MAIN UNITS OF CCM PROCESS EQUIPMENT

Presence of cracks and other surface defects is completely prohibited at exploitation of industrial facilities. This condition is of vital importance for component parts of a complex of big equipment. For example, for continuous casting machines (CCMs), whose total weight exceeds several thousand metric tons a failure of a single component part can lead to serious consequences, due to imminent huge material losses. Such hard conditions of such equipment not only influence its operation, reducing its service life, but also may have a negative impact on the quality of production. Such negative influence can be expressed in the following way: regulation of the main units may be altered following overheating of the equipment, due to thermal expansion of mostly heated elements. In case of presence of cracks in the most loaded unit of dummy bar –its head part its bearing capacity may be altered and appearance of excessive deformations may not be excluded, i.e. its transverse dimensions may be changed. Besides, cracks in the locking part of the dummy bar are out of the question, in order to avoid solidification of liquid metal in cracks.

The problem of reducing intensity of cracks formation can be solved in different ways. Its practical solution depends upon the part's design and peculiarities of its loading. For operation of dummy bars of slab casting CCMs it should be noted that this problem is closely connected with asymmetric design of dummy bars heads and one-way heat delivery and removal for its locking part. The finite elements method was used for the analysis of stress-strain state in the article. Three-dimensional simulation models were divided into finite elements and after that they underwent various theoretically possible loads. Simulation made it possible to establish the most vulnerable sections of the design, undergoing most severe loads, in case they are applied. Particularly, it was found out that the edge parts of transverse section of a dummy bar head experience the biggest deformations, consequently, cracks can spring up at a certain pitch and develop on the surface of the projection of the lock. The analysis of the initial data showed that for reduction of thermal strain in the lock projection it was necessary to make deformation inside its upper layers more free. It will be possible if a transverse slot is made, dividing the projection length into two elements. Heating and cooling of the surface lock's layer could become safer, at that, from the point of view of elongating stresses, thus reducing the probability of cracks formation.

Keywords: *Continuous casting machines, dummy bars, tension, cracks, defects, strain reducers, simulation.*

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Андилахай А. А.

Статья поступила 10.02.2019 г.

УДК 621.791.75

Размышляев А. Д., Агеева М. В.

РАСЧЕТ ИНДУКЦИИ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ

Показано, что в настоящее время имеющиеся расчетные методики, позволяющие определить индукцию продольного магнитного поля (ПРМП) под торцом сварочного электрода, обладающего ферромагнитными свойствами, отличаются значительной сложностью. Еще больше усложняется расчетная методика, если не только электрод, но и изделие изготовлены из ферромагнитных материалов. Имеющаяся простая методика для

Режим доступа: <http://sap.pstu.edu>

определения индукции ПРМП в этой зоне применима только при использовании немагнитной сварочной проволоки и изделия (пластины). На основе выполненных экспериментов установлено, что, если электрод ферромагнетик, а изделие немагнитное, то индукция под торцом электрода (проволоки Св-08А диаметром 5 мм) возрастает в 7 раз по сравнению с ее значениями, когда электрод не является ферромагнетиком. Если и электрод, и изделие – ферромагнетики, то индукция B_z ПРМП возрастает под торцом электрода в 9 раз. Это справедливо при дуговой наплавке проволокой Св-08А (ферромагнитной) диаметрами 3 и 4 мм при расстоянии от торца электрода до изделия до 10 мм. Это справедливо также не только при использовании проволоки Св-08А из ферромагнитного материала, но и для других проволок, являющихся ферромагнетиками, например, Нп-30ХГСА и Св-08Г2С, которые широко применяют для сварки и наплавки. Показано, что вниз от торца электрода к изделию индукция уменьшается по установленной ранее зависимости. В зоне электродной капли, т.е. на расстоянии 2...3 мм от торца электрода наблюдается хорошая сходимость расчетных и экспериментальных данных о величине продольной компоненты индукции ПРМП. Эти данные важны для объяснения поведения электродной капли на торце как немагнитного, так и ферромагнитного электрода при наплавке с воздействием ПРМП. Разработанная расчетная методика предлагается к использованию при дуговой наплавке (сварке) проволокой под флюсом с воздействием управляющих ПРМП.

Ключевые слова: дуговая наплавка, проволока, продольное магнитное поле, индукция, ферромагнетик, расчетная методика.

Постановка проблемы. Актуальной проблемой является повышение эффективности процесса электродуговой наплавки и сварки проволокой под флюсом. В настоящее время исследовано влияние продольного магнитного поля (ПРМП) на геометрические размеры швов при сварке. Однако нет исследований об индукции управляющего ПРМП, которые генерирует устройство ввода (УВ) ПРМП, и методов ее расчета.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [1] приведена методика расчета продольной компоненты индукции (B_z) ПРМП под торцом электродной проволоки (немагнитной, с магнитной проницаемостью $\mu = 1$) при дуговой наплавке. В этой методике используются данные о величине намагничивающей силе обмотки (величине ампервитков – $I \cdot W$) и следующих конструктивных размеров УВ ПРМП (рис. 1): d_n – наружный диаметр ферромагнитного сердечника (I); число витков (W) обмотки (2); высота обмотки – L ; расстояние от торца сердечника (I) до изделия-пластины – Δ . Диаметр электродной проволоки (d_s) в методике не используется, поскольку предполагается, что электрод из немагнитного материала, изделие также – из немагнитного материала ($\mu = 1$).

Следует отметить, что размер Δ на рис. 1 (воздушный зазор) символизирует наличие на торце электрода жидкой капли ($\mu = 1$) и сварочной дуги ($\mu = 1$). Поскольку все тела системы УВ ПРМП (кроме ферросердечника) не являются ферромагнетиками, и не искажают строение магнитного поля, которое генерирует УВ ПРМП, то по методике работы [1] возможно определить индукцию B_z в любой точке вдоль оси OZ.

Однако на практике, чаще всего, имеет место ситуация, когда либо электрод, либо изделие, либо одновременно и электрод и изделие являются ферромагнитными телами, которые искажают строение магнитного поля в зоне под ферросердечником УВ ПРМП. В этом случае расчетная методика работы [1] не применима. Имеется программа ANSYS [2], которая позволяет определить индукцию в зоне под торцом ферросердечника УВ ПРМП, но она является чрезвычайно сложной, что затрудняет ее использование [3]. В работе [4] на основе метода вторичных источников [5, 6] такая задача решена, программа расчетов при этом проще, чем программа ANSYS, поскольку относится к системе симметричных

Режим доступа: <http://sap.pstu.edu>

(относительно оси OZ по рис. 1) тел. В этой методике интегрально-дифференциальные уравнения решаются численно методом блочной интеграции, что затрудняет ее использование. В работе [7] аналогичная задача для осесимметричной системы ферромагнитных тел (УВ ПРМП) решена с использованием метода векторного магнитного потенциала в стационарных плоскомеридиальных магнитных полях. Эта методика проще, чем методики, приведенные в работах [2, 4]. Задача здесь решалась также численным методом конечных разностей, что также затрудняет ее использование в инженерной практике.

Цель работы. Целью настоящей работы является разработка инженерной расчетной методики, позволяющей определить численные значения продольной компоненты продольного магнитного поля под торцом электрода при дуговой наплавке, когда изделие и электрод являются ферромагнитными телами.

Основные направления исследований. Экспериментально исследовали строение магнитного поля (индукцию) при использовании УВ ПРМП таких же конструктивных размеров, как и в работе [7], а именно (рис. 1): $R = d_n/2 = 25$ мм (d_n – наружный диаметр ферросердечника); $L = 50$ мм; $H = 40$ мм; $\Delta = 5$ мм; диаметр проволоки Св-08А – $d_3 = 5$ мм (ферромагнетик, $\mu \approx 500$), либо из стали 12Х18Н10Т ($\mu = 1$). Данные о магнитных свойствах, использованных в данной работе материалов, приведены в работе [8]. Число витков однослойной обмотки (2) составляло $W = 20$, в обмотке пропускали постоянный ток величиной $I = 50$ А ($I \cdot W = 1000$). Измеряли продольную (B_z) и радиальную (B_r) компоненты индукции миллитесламетром 42305 с датчиком Холла с базой 0,9x0,9 мм вдоль оси OZ от точки 0, если электрод и изделие из немагнитных материалов и от точки А (рис. 1), если электрод и изделие из ферромагнитных материалов. Измеряли также значения индукции B_z у поверхности стержня (1) ($Z = 0$). В таблице приведены средние значения B_z из 3-х измерений в характерных точках ($I \cdot W = 1000$).

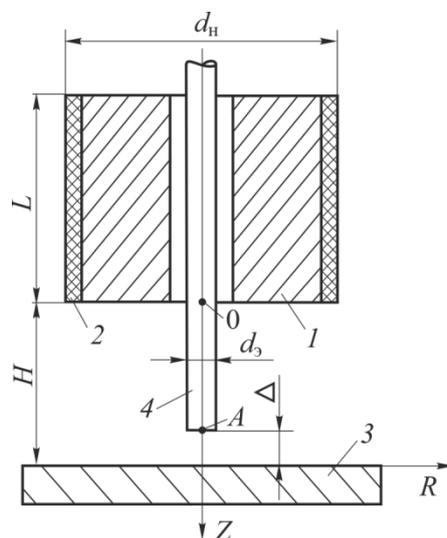


Рисунок 1 – Схема системы тел для определения индукции магнитного поля:

1 – ферросердечник; 2 – обмотка; 3 – изделие; 4 – электродная проволока

Вычисляли также значения индукции B_z в точке 0 (рис. 1) по формуле [1]:

$$B_z = \mu_0 \frac{IW}{2L} \cdot \frac{L}{\sqrt{R^2 + L^2}}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

R – радиус ферросердечника, $R = d_{\text{ш}}/2 = 25$ мм.

Вычисленные по формуле (1) значение B_z умножали (увеличивали) на коэффициент n , определяемый по формуле [1]:

$$n = 3,75 - 0,0912(F_c - 2,08), \quad (2)$$

где F_c – поперечное сечение стержня (рис. 1, поз. 1) УВ ПРМП, см².

Коэффициент n учитывает наличие ферросердечника в УВ ПРМП.

Наблюдается увеличение индукции B_z под торцом ферромагнитного электрода (изделие – немагнитное) в 7 раз по отношению к величине B_z , если электрод из немагнитного материала (в точке «А», $Z = 35$ мм). Если и электрод, и изделие – ферромагнетики, то увеличение B_z выше точки «А» составляет – 9 (по сравнению со значением B_z , если и электрод, и изделие из немагнитных материалов, когда в точке «А» $B_z = 10$ мТл).

На участке оси OZ от $Z = 35$ мм до $Z = 40$ мм ($R = 0$) наблюдается резкое уменьшение индукции B_z (п.п. 2, 3 таблицы).

Таблица 1 – Значения индукции в исследуемых точках

№№ пп	Магнитные свойства тел		Расстояние Z, мм	Индукция B_z , мТл
	электрод	изделие		
1	Немагнитное, $\mu = 1$	Немагнитное, $\mu = 1$	0	25
			35	10
			40	9
2	Ферромагнетик	Немагнитное, $\mu = 1$	0	40
			35	70
			40	24
3	Ферромагнетик	Ферромагнетик	0	50
			35	90
			40	40

В работе [1] показано, что ферросердечник (1) УВ ПРМП является намагниченным телом и индукция B_z от его торца (от точки «0» на рис. 1) вдоль оси OZ уменьшается в соответствии с формулой:

$$\frac{B_z}{B_{z\max}} = \frac{R^2}{R^2 + Z^2}, \quad (3)$$

где Z – координата точки, отсчитываемая от точки «0» (рис.1), м;

$B_{z\max}$ – значение индукции (мТл) в точке «0» (рис. 1).

Полагали, что ферромагнитный электрод (1) в составе УВ ПРМП является намагниченным телом (при протекании тока в обмотке. Полагали, что аналогично можно

Режим доступу: <http://sap.pstu.edu>

вычислить значения B_z вдоль оси OZ от торца электрода (от точки «А» по рис. 1) по формуле:

$$\frac{B_z}{B_{z\max}} = \frac{r_3^2}{r_3^2 + Z^2}, \quad (4)$$

где r_3 – радиус электрода; $r_3 = d_3/2 = 2,5$ мм;

$B_{z\max}$ – значение индукции в точке «А» (у торца электрода, мТл), приведенные в таблице.

Установлено (рис. 2), что в варианте системы тел (УВ ПРМП), приведенных в таблице, относительные значения $B_z/B_{z\max}$ близки между собой. Вычисленные по формуле (4) значения $B_z/B_{z\max}$ приведены в виде значков – Δ (на рис. 2). Наблюдается их полное совпадение с экспериментальными данными только на участке ниже $Z = 0 \dots 2$ мм от торца электрода, т.е. в зоне расположения электродной капли. Это важно для анализа поведения электродной капли при наплавке с воздействием ПРМП. Для получения данных о радиальной компоненте индукции мы использовали другие подходы, о которых будет сообщено в последующей публикации.

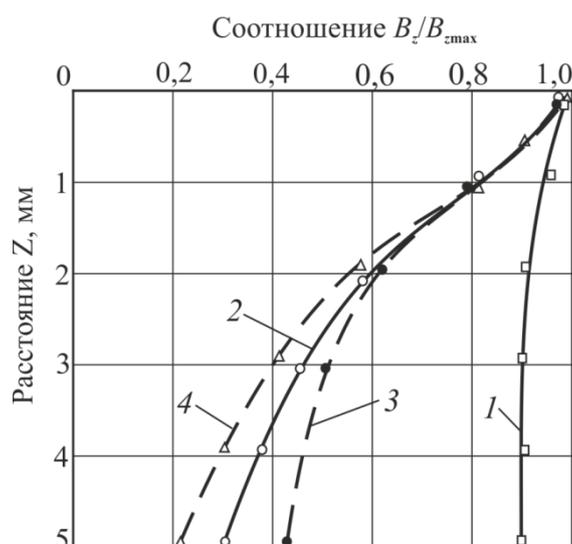


Рисунок 2 – Распределение относительных значений $B_z/B_{z\max}$ вдоль оси OZ ($H = 40$ мм; $\Delta = 5$ мм; $d_3 = 5$ мм): 1, 2, 3 – соответствуют пунктам 1, 2, 3 таблицы; 4 – расчетные значения

Таким образом, для расчетов значения B_z под торцом ферромагнитного электрода необходимо расчетные данные, полученные по методике работы [1] увеличить в 7, если только электрод ферромагнетик, а если и электрод, и изделие – ферромагнетики, то увеличить в 9 раз (см. таблицу). Это необходимо выполнить не только при использовании проволоки Св-08А из ферромагнитного материала, но также и для других проволок, являющихся ферромагнетиками, например, Нп-30ХГСА и Св-08Г2С. Это будут значения индукции $B_{z\max}$ при увеличении расстояния Z (от торца электрода вниз к изделию). Эти значения $B_{z\max}$ следует уменьшить (умножить) на коэффициент $\frac{r_3^2}{r_3^2 + Z^2}$, (Z – расстояние от

торца электрода, мм). Проверка показала, что значения индукции у торца электрода, указанные в таблице, соблюдается и для электродов диаметром 3 и 4 мм и расстояниях Δ до 10 мм.

Таким образом, по разработанной методике возможно получить численные значения индукции B_z в зоне под торцом электрода при наличии электрода, либо и электрода и изделие из ферромагнитных материалов применительно к дуговой наплавке проволокой с воздействием ПРМП.

ВЫВОДЫ

1. Разработанная на основе обработки экспериментальных данных расчетная методика позволяет определить значения продольной компоненты индукции ПРМП у торца ферромагнитного электрода, если изделие из немагнитного, либо ферромагнитного материала.

2. Установлено, что от торца ферромагнитного электрода к изделию эта компоненты индукции B_z уменьшается в соответствии с формулой $\frac{r_3^2}{r_3^2 + Z^2}$, (Z – расстояние от торца электрода).

Список использованных источников:

1. *Размышляев, А. Д.* К расчету численных значений индукции управляющего поперечного магнитного поля в головной части сварочной ванны. / *А. Д. Размышляев, М. В. Агеева* // Наука та виробництво : зб. наук. праць / ДВНЗ «ПДТУ». – Мариуполь, 2018. – Вип. 19. – С. 51–58.

2. *Андреева, Е. Г.* Расчет стационарных магнитных полей и характеристик электротехнических устройств с помощью программного пакета ANSYS [Электронный ресурс] / *Е. Г. Андреева, С. П. Шамец, Д. В. Колмогоров* // Electronic scientific journal «Oil and Gas Business». – 2005. – № 1. – Режим доступа: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Andreeva/Andreeva_1.pdf

3. *Размышляев, А. Д.* Автоматическая электродуговая сварка под флюсом с воздействием внешнего магнитного поля : монография / *А. Д. Размышляев, П. А. Выдмыш, М. В. Агеева*. – Мариуполь: ПГТУ, 2017. – 209 с.

4. *Размышляев, А. Д.* Расчет индукции магнитного поля соленоида с ферромагнитным сердечником применительно к дуговой наплавке / *А. Д. Размышляев, В. Р. Маевский, С. М. Сидоренко* // Автоматическая сварка. – 2001. – № 8. – С. 22–24.

5. *Бессонов, Л. А.* Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / *Л. А. Бессонов*. – М. : Высш. школа, 1986. – 263 с.

6. *Тозони О. В.* Метод вторичных источников в электротехнике / *О. В. Тозони*. – М. : Энергия, 1975. – 296 с.

7. *Размышляев, А. Д.* Расчет индукции управляющего продольного магнитных свойств сердечника проволоки и изделия применительно к дуговой наплавке / *А. Д. Размышляев, А. А. Дели, М. В. Миронова* // Автоматическая сварка. – 2006. – № 8. – С. 12–15.

8. *Размышляев, А. Д.* Магнитное управление формированием валиков и швов при дуговой наплавке и сварке : монография / *А. Д. Размышляев, М. В. Миронова*. – Мариуполь: ПГТУ, 2009. – 242 с.

Размишляєв О. Д., Агеєва М. В.

РОЗРАХУНОК ІНДУКЦІЇ ПОЗДОВЖНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПРИ ДУГОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ

Показано, що в даний час розрахункові методики, що дозволяють визначити індукцію поздовжнього магнітного поля (ПДМП) під торцем зварювального електрода, який має ферромагнітні властивості, відрізняються значною складністю. Ще більше ускладнюється розрахункова методика, якщо не тільки електрод, а й виріб виготовлені з ферромагнітних матеріалів. Наявна проста методика для визначення індукції ПДМП в цій зоні може бути застосована тільки при використанні немагнітних зварювального дроту і виробу (пластини). На основі виконаних експериментів встановлено, що, якщо електрод ферромагнетик, а виріб немагнітний, то індукція під торцем електрода (дроту Св-08А діаметром 5 мм) зростає в 7 разів в порівнянні з її значеннями, коли електрод не є ферромагнетиком. Якщо і електрод, і виріб - ферромагнетики, то індукція B_z ПДМП зростає під торцем електрода в 9 разів. Це справедливо при дуговому наплавленні дротом Св-08А (ферромагнітним) діаметрами 3 і 4 мм при відстані від торця електрода до виробу до 10 мм. Це справедливо також при використанні не тільки дроту Св-08А з ферромагнітного матеріалу, але і для інших дротів, які є ферромагнетиками, наприклад, Нп-30ХГСА та Св-08Г2С, що широко застосовують для зварювання і наплавлення. Показано, що вниз від торця електрода до виробу індукція зменшується за встановленою раніше залежністю. У зоні електродної краплі, тобто на відстані 2...3 мм від торця електрода спостерігається хороша збіжність розрахункових і експериментальних даних про величину поздовжньої компоненти індукції ПДМП. Ці дані важливі для пояснення поведінки електродної краплі на торці як немагнітного, так і ферромагнітного електрода при наплавленні з дією ПДМП. Розроблена розрахункова методика пропонується до використання при дуговому наплавленні (зварюванні) дротом під флюсом з дією керуючих ПДМП.

Ключові слова: дугове наплавлення, дріт, поздовжнє магнітне поле, індукція, ферромагнетик, розрахункова методика.

Razmyshlyayev A. D., Ahieieva M. V.

CALCULATION OF THE LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD INDUCTION AT ARC SURFACING

It is shown that currently available calculational methods, allowing to determine the induction of longitudinal magnetic field (LMF) under the end of the welding electrode, which has ferromagnetic properties, are of considerable complexity. The calculation procedure becomes even more complicated, if not only the electrode, but also the product are made of ferromagnetic materials. The available simple method for determining the induction of the LMF in this zone is applicable only when using non-magnetic welding wires and products (plates). On the basis of the experiments performed, it was found that if the electrode is a ferromagnet and the product is non-magnetic, that the induction under the electrode end (wire Sv-08A with a diameter of 5 mm) increases by 7 times compared with its values when the electrode is not a ferromagnet. If both the electrode and the product are ferromagnets, then the LMF induction B_z increases under the electrode end 9 times. This is true when arc surfacing with wire Sv-08A (ferromagnetic) with diameters of 3 and 4 mm with a distance from the electrode end to the product up to 10 mm. This is

Режим доступу: <http://sap.pstu.edu>

also true when using not only Sv-08A wire made of ferromagnetic material, but also for other wires that are ferromagnetic, for example, Hn-30HGSA and Sv-08G2S, which are widely used for welding and surfacing. It is shown that down from the electrode end to the product, the induction decreases according to the previously established dependence., there is a good convergence of the calculated and experimental data on the longitudinal component magnitude of the induction LMF in the electrode drop area, i.e. at a distance of 2...3 mm from the electrode end. These data are important for explaining the behavior of an electrode droplet at the end of both a nonmagnetic and ferromagnetic electrode during surfacing with the LMF action. The developed calculation method is proposed for use in submerged arc surfacing (welding) with wire under flux with the control LMF action.

Keywords: arc surfacing, wire, longitudinal magnetic field, induction, ferromagnetic, calculation method.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Андилахай А. А.
Статья поступила 10.02.2019 г.

УДК 621.875

Сагіров Ю. Г., Суглобов В. В.

МОДЕЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ ТА АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОЛОНИ ПОРТАЛЬНОГО КРАНА «КОНДОР»

Уточнення методів розрахунків елементів порталних кранів на міцність, розробка нових методологій є важливим науково-технічним завданням, рішення якого дозволить підвищити безпеку експлуатації крана в цілому. Метою даної роботи є моделювання навантаженості колони порталного крана «Кондор» під час роботи з застосуванням методу кінцевих елементів (МСЕ) та аналіз фактичного напружено-деформованого стану її елементів. Об'єктом дослідження є закономірність розподілу напружень в елементах колони. У статті запропонована методологія моделювання та аналізу напружено-деформованого стану колони порталного крана «Кондор», яка ґрунтується на методах розрахунків на міцність за допустимими напруженнями та методу скінченних елементів.

Розроблено розрахункову схему, твердотільно-деформовану модель та виконаний розрахунок методом скінченних елементів у CAD/CAE системі. Наведено результати розрахунків та аналізу. Отримана закономірність розподілу напружень в елементах колони наочно показала, що напруження розподілені нерівномірно; напружено-деформований стан елементів колони є досить складним і вимагає додаткових досліджень.

Ключові слова: порталний кран, колона, металоконструкція, оптимізація, просторова модель, розрахункова схема, метод скінченних елементів, критерії.

Постановка проблеми.

Несучі металоконструкції порталних кранів є досить масоємними і такими, що у переважній більшості, визначають кінцеву вартість. Під час проектування багато уваги приділяється режимам їх навантажень і дотриманню вимог по жорсткості, втомній і статичній міцностях і ін. Застосування оптимізаційного підходу до проектування саме несучих металоконструкцій є найбільш ефективним [1], тому що навіть незначне зниження ваги дає суттєву економію ресурсів, як матеріальних, так і трудових, і фінансових.