

электрокорунда можно рассматривать главным образом как средство повышения производительности обработки.

Список литературы: 1 *Эльясберг М. Е.* Автоколебания металлорежущих станков / *М. Е. Эльясберг.* – Издание ОКБС. – С.-Петербург, 1993. – 180 с. 2. *Зубарев Ю.М.* Расчет шпиндельных устройств станка на устойчивость резания / *Зубарев Ю.М., Агаркова Н.Н., Сикалова М.А.* // Физические процессы при резании металлов. – Сб. н.р. Волгоград – Ижевск. Изд ВолгГТУ, Волгоград, 1997. – С. 114–119. 3. *Афонина Н.А.* Повышение виброустойчивости процесса токарной обработки на основе управляемых колебаний скорости резания: автореф. дис. . канд. техн. наук (05.03.01) / *Афонина Наталья Александровна*; Тул. гос. ун-т. Тула, 2004. – 18 с. 4. *Тлустый И. М.* Автоколебания в металлорежущих станках / *И. М. Тлустый.* М.: Машиностроение, 1956. – 234 с. 5. *Zhang H., Ni Jun, Shi H.* Machining Chatter Suppression by Means of Spindle Speed Variation, Part 1, Numerical Simulation; Part 2, Experimental Investigation. /Proceedings of the First S. M. Wu Symposium on Manufacturing Science, 1994, pp. 161–175.

Bibliography (transliterated): 1 *Elyasberg M. Ye.* Avtokolebaniya metallorezhushchikh stankov *M. Ye. Elyasberg.* – Izdaniye OKBS. – S.-Peterburg, 1993. – 180 p. 2. *Zubarev Yu.M.* Raschet shpindelnykh ustroystv stanka na ustoychivost rezaniya *Zubarev Yu.M., Agarkova N.N., Sikalova M.A.* Fizicheskiye protsessy pri rezanii metallov. – Sb. n.r. Volgograd – Izhevsk. Izd VolgGTU, Volgograd, 1997. – P. 114 – 119. 3. *Afonina N.A.* Povysheniye vibroustoychivosti protsessa tokarnoy obrabotki na osnove upravlyayemykh kolebaniy skorosti rezaniya: avtoref. dis. . kand. tekhn. nauk (05.03.01) *Afonina Natalya Aleksandrovna*; Tul. gos. un-t. Tula, 2004. – 18 p. 4. *Tlustyy I. M.* Avtokolebaniya v metallorezhushchikh stankakh *I. M. Tlustyy.* Moscow: Mashinostroyeniye, 1956. – 234 p. 5. *Zhang H., Ni Jun, Shi H.* Machining Chatter Suppression by Means of Spindle Speed Variation, Part 1, Numerical Simulation; Part 2, Experimental Investigation. Proceedings of the First S. M. Wu Symposium on Manufacturing Science, 1994, pp. 161–175.

Поступила (received) 29.10.2014

УДК 620.179.14

Г. М. СУЧКОВ, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
Ю. В. ХОМЯК, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;
С. Н. ГЛОБА, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;
А. Ю. СЛОБОДЧУК, аспирант, НТУ «ХПИ»

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ОБРАЗЦЕ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ПОЛЕМ ЛИНЕЙНОГО ТОКА

Проведен анализ распространенных методов и средств неразрушающего контроля металлоизделий. Изучены особенности вихретокового контроля. Показаны соотношения для векторного потенциала магнитного поля созданного переменным током линейного проводника. Проведен расчет плотности вихревых токов в листовом образце из ферромагнитного и неферромагнитного металлов. Показан сложный характер распределения потока вихревых токов, который зависит от свойств контролируемого металла.

Ключевые слова: вихретоковая дефектоскопия, вихретоковый преобразователь, объект контроля, плотность тока, векторный потенциал.

Введение. В настоящее время существуют различные методы неразрушающего контроля качества металлоизделий [1]. Среди наиболее применяемых на практике можно выделить вихретоковый метод. Его преимущества:

- отсутствие контактной жидкости между преобразователем и объектом контроля (ОК) (в отличие от ультразвукового метода);
- возможность измерения через зазор от долей миллиметров до нескольких миллиметров (без контакта);
- высокая чувствительность к микроскопическим дефектам, расположенным непосредственно на поверхности либо близко к поверхности ОК;
- высокая точность и повторяемость выявления дефектов;
- высокая скорость контроля;
- минимальные требования к состоянию поверхности;
- возможность контроля через защитные непроводящие покрытия;
- вихретоковый метод нетоксичен и не представляет опасности здоровью оператора.

Вихретоковые методы контроля основаны на анализе взаимодействия вихретокового преобразователя (ВТП) с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем ОК.

Учитывая указанные преимущества данного метода контроля, его детальное изучение является актуальной задачей.

В известной литературе посвященной вихретоковому методу наибольшее внимание уделяется регистрации полей индуцированных токов, при этом распределение плотности самих вихревых токов остается недостаточно раскрытым. Однако, правильное представление о распределении плотности вихревых токов является необходимым для всей теории вихретокового контроля.

Цель статьи – определить распределение плотности вихревых токов индуцированных линейным проводником расположенным вблизи поверхности металлического образца. Актуальность данного исследования заключается в том, что рассматривается возбуждение вихревых токов источником неоднородного поля, которым и является проводник с током.

Постановка задачи. Для более детального анализа взаимодействия ВТП с объектом контроля обратимся к физическим аспектам образования электромагнитного поля вблизи поверхности проводящего тела. Для упрощения понимания сути работы ВТП будем рассматривать модель, в которой участки катушек выполнены прямолинейными проводниками. В таком случае

взаимодействие преобразователя с объектом определяется системой уравнений Максвелла [2-4] в применении к случаю на рис. 1.

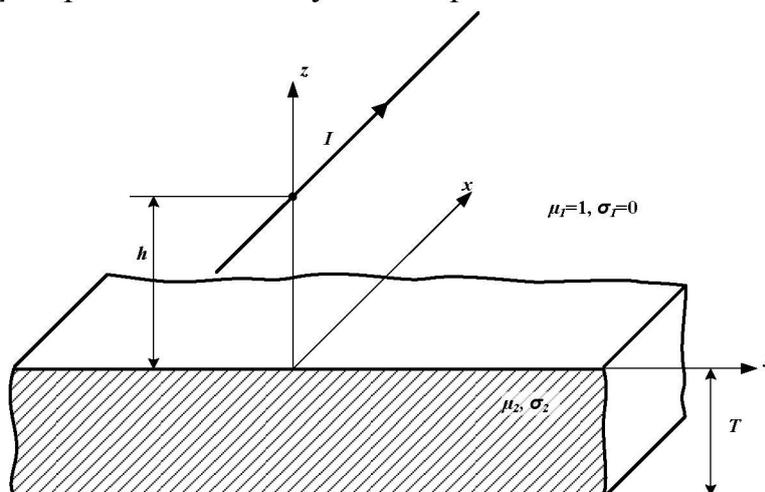


Рис. 1 – Проводник с током над объектом контроля

Для определения параметров электромагнитного поля созданного током в проводнике примем следующие предположения: металлический объект неподвижен относительно электромагнитного поля, среда изотропна и ее параметры не зависят от напряженностей полей, поле возбуждающего тока квазистационарно в том смысле, что волновыми процессами в воздухе можно пренебречь. Это вполне оправдано т.к. размеры ВТП и ОК обычно много меньше длины волны в воздухе, а потери на излучение по сравнению с потерями в ОК малы. Будем считать, что магнитная проницаемость материала объекта не зависит от напряженности магнитного поля, а ток возбуждения изменяется по гармоническому закону, то есть $\dot{I} = I_{\max} e^{j\omega t}$.

Для случая (рис. 1) когда проводник с током расположен вдоль направления x векторный потенциал, создаваемый им, будет иметь только одну составляющую $A_x(y, z)$ т.к. $I_y=0, I_z=0$. Тогда можно использовать решения для векторного потенциала магнитного поля в трех областях [5–7]. Для верхнего полупространства (над поверхностью ОК)

$$\dot{A}_1 = \frac{\mu_0 \dot{I}}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(e^{-\lambda|z-h|} + c_1 e^{-\lambda(z+h)} \right) \frac{e^{2j\lambda y}}{\lambda} d\lambda. \quad (1)$$

Для области ОК

$$\dot{A}_2 = \frac{\mu_0 \mu_2 \dot{I}}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(b_2 e^{q_2 z} + c_2 e^{-q_2 z} \right) \frac{e^{\lambda(2jy-h)}}{q_2} d\lambda. \quad (2)$$

Для нижнего полупространства (под нижней поверхностью ОК)

$$\dot{A}_3 = \frac{\mu_0 \dot{I}}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} b_3 \frac{e^{\lambda(2jy+z-h)}}{\lambda} d\lambda. \quad (3)$$

Решение уравнений (1–3) возможно с учетом:

$$k^2 = -j\omega\mu\mu_0\sigma; \quad q^2 = \lambda^2 - k^2; \quad (4)$$

$$c_1 = \frac{(\lambda^2 \mu_2^2 - q_2^2)(e^{q_2 T} - e^{-q_2 T})}{(\lambda\mu_2 + q_2)^2 e^{q_2 T} - (\lambda\mu_2 - q_2)^2 e^{-q_2 T}}; \quad (5)$$

$$c_2 = \frac{2q_2(q_2 - \lambda\mu_2)e^{-q_2 T}}{(\lambda\mu_2 + q_2)^2 e^{q_2 T} - (\lambda\mu_2 - q_2)^2 e^{-q_2 T}}; \quad (6)$$

$$b_2 = \frac{2q_2(q_2 + \lambda\mu_2)e^{q_2 T}}{(\lambda\mu_2 + q_2)^2 e^{q_2 T} - (\lambda\mu_2 - q_2)^2 e^{-q_2 T}}; \quad (7)$$

$$b_3 = \frac{4q_2 \lambda \mu_2 e^{\lambda T}}{(\lambda\mu_2 + q_2)^2 e^{q_2 T} - (\lambda\mu_2 - q_2)^2 e^{-q_2 T}}. \quad (8)$$

Плотность вихревых токов можно определить через векторный потенциал в области ОК

$$\dot{J} = -j\sigma\omega\dot{A}_2. \quad (9)$$

Как видно из уравнений (1)-(9) основными параметрами определяющими формирование вихревых токов являются магнитная проницаемость, электрическая проводимость материала образца и частота возбуждающего тока. Также эти параметры определяют классическую глубину проникновения электромагнитного поля $\delta = \sqrt{2/(\omega\mu\mu_0\sigma)}$.

Результаты исследований. Используя соотношения (1)-(9) было получено распределение плотности вихревого тока в сечении металлического листа (рис.2). Расчет произведен при следующих параметрах: толщина металлического листа – 10 мм; расстояние от проводника до поверхности металла – 0,1 мм; сила возбуждающего тока – 1 А. Распределения получены для двух металлов – немагнитного и ферромагнитного, с одинаковым произведением $\mu\sigma$, то есть с одинаковой классической глубиной проникновения поля. В силу ограниченности статьи приведены результаты расчетов на трех частотах – 100 Гц, 1 кГц, 10 кГц.

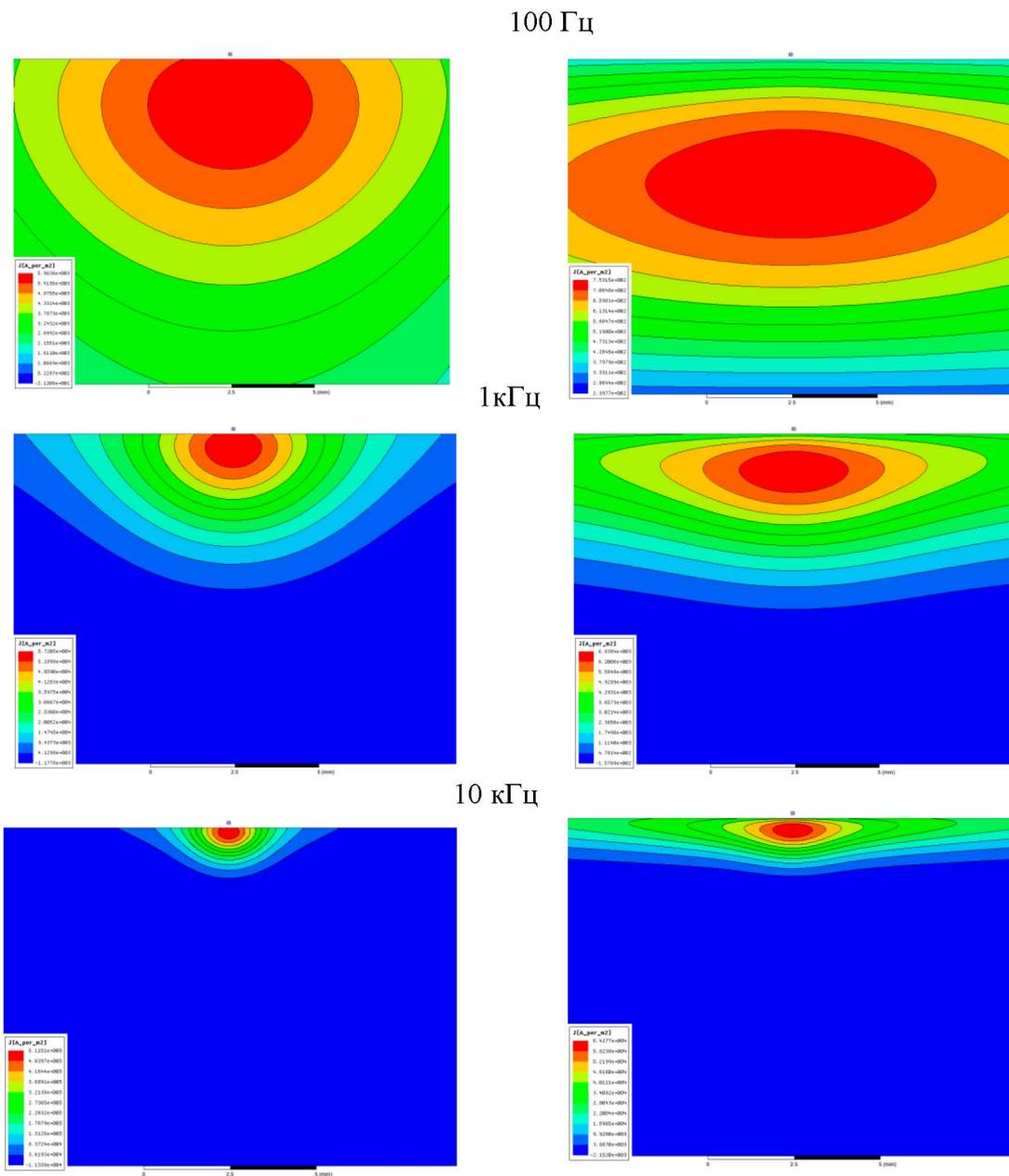


Рис.2. – Распределение плотности индуцированного тока в сечении металлического образца (слева – для немагнитного металла, справа – для ферромагнетика)

Выводы. Для секущей плоскости перпендикулярной возбуждающему току построены графики, позволяющие оценить параметры вихревых токов в толще как неферромагнитного так и ферромагнитного металлов. Обращает на себя внимание тот факт, что максимальное значение плотности вихревого тока находится на некоторой глубине, а не на поверхности ОК. Эта глубина зависит от свойств металла и частоты возбуждающего тока. Для ферромагнитного материала следует отметить большее растекание вихревых токов вблизи поверхности по сравнению с немагнитным металлом. На наш взгляд, приведенный материал показывает сложный характер распределения плотности

вихревых токов. Поэтому для создания наиболее эффективных преобразователей, регистрирующих поля дефектов с возможной их количественной оценкой, необходимо наиболее полно знать закономерности формирования потока, создающего эти поля.

Перспектива дальнейших исследований. При проведении дальнейших работ планируется провести исследования и анализ распределения плотности вихревых токов вблизи поверхностной трещины.

Список литературы: 1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика [Текст]: справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, Ковалев А. В. и др.; под ред. В.В. Клюева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с. 2. Ландау Л.Д. Теория поля. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Издание 7-е, исправленное. – М.: Наука. – 1988. – 512с. 3. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы / И.Е. Иродов. – 7-е изд. – М.: Бином. Лаборатория знаний. – 2009. – 319 с. 4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 263 с. 5. Федосенко Ю.К. Вопросы теории вихретоковой дефектоскопии накладными преобразователями. Строгое математическое решение двумерных задач. / Ю.К. Федосенко // Дефектоскопия. – 1982. – No2. – с.1-9. 6. Хомяк Ю.В. Вихретоковый дефектоскоп с компенсацией влияния состояния поверхности ферромагнитных металлоизделий [Рукопись]: дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Ю.В. Хомяк ; Харьковский политехнический ин-т, нац. техн. ун-т. – Харьков, 2013. – 168 с. 7. Соболев В.С. Накладные и экранные датчики: для контроля методом вихревых токов / Акад.наук.Ин-т автоматизации и электротехники. / В.С. Соболев, Ю.М. Шкарлет. – Новосибирск: Наука, 1967. – 144 с.

Bibliography (transliterated): 1. Klyuev V.V. Nerazrushayuschiy kontrol i diagnostika [Tekst]: spravochnik V.V. Klyuev, F.R. Sosnin, Kovalev A. V. i dr.; Pod red. V.V. Klyueva. – 3-e izd., pererab. i dop. – Moscow: Mashinostroenie, 2005. – 656 p. 2. Landau L.D. Teoriya polya. L.D. Landau, E.M. Lifshits. Izdanie 7-e, ispravlennoe. – Moscow: Nauka. – 1988. – 512 p. 3. Irodov I.E. Elektromagnetizm. Osnovnyie zakonyi I.E. Irodov. – 7-e izd. – Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy. – 2009. – 319 p. 4. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovyi elektrotehniki. Elektromagnitnoe pole: Uchebnik dlya elektrotehn., energ., priborostroit. spets. vuzov. – 8-e izd., pererab. i dop. – Moscow: Vyssh. shk., 1986. – 263 p. 5. Fedosenko Yu.K. Voprosyi teorii vihretokovoy defektoskopii nakladnyimi preobrazovatelyami. Strogoe matematicheskoe reshenie dvumernyih zadach. Yu. K. Fedosenko Defektoskopiya. – 1982. – No2. – P.1-9. 6. Homyak Yu.V. Vihretokovyyi defektoskop s kompensatsiey vliyaniya sostoyaniya poverhnosti ferromagnitnyih metalloizdeliy [Rukopis]: dis. ... kand. tehn. nauk : 05.11.13 Yu.V. Homyak ; Kharkovskiy politehnicheskiiy in-t, nats. tehn. un-t. – Kharkov, 2013. – 168 p. 7. Sobolev V.S. Nakladnyie i ekrannyie datchiki: dlya kontrolya metodom vihrevyih tokov Akad.nauk.In-t avtomatiki i elektrometrii. V.S. Sobolev, Yu.M. Shkarlet. – Novosibirsk: Nauka, 1967. – 144 p.

Поступила (received) 25.10.2014

УДК 621.7

В. Л. ХОРОЛЬСКИЙ, ассистент, КрНУ им. М. Остроградского,
Кременчуг

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НАТЯГА ПРИ БАНДАЖИРОВАНИИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ОТРЕЗНЫХ МАТРИЦ

В работе определены величины натяга при бандажировании твердосплавных отрезных матриц, что позволяет исключить появление растягивающие тангенциальные напряжений в процессе отрезки. Предложена методика расчёта необходимой величины натяга по величине максимального

© В. Л. Хорольский, 2014