

УДК 621.98.044.7

А. Н. Матяс¹,А. М. Милиукова², кандидат технических наук, доцент,В. В. Малеронок³, кандидат технических наук, доцент^{1,2}Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220084 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 367 60 10, priemnaya@phti.by³Белорусская государственная академия авиации, ул. Уборевича, 77, 220096 Минск, Республика Беларусь

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В ANSYS И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ СИСТЕМЫ «ИНДУКТОР—ИЗДЕЛИЕ»

Исследовательская работа направлена на анализ результатов численного моделирования процесса упрочняющей магнитно-импульсной обработки плоского режущего инструмента с помощью программного обеспечения ANSYS. Опираясь на полученные результаты, поставлена цель выработать практические рекомендации по взаимному расположению обрабатываемого изделия по отношению к индуктору для более эффективного упрочнения.

С использованием модуля Ansys Electronics Desktop (Maxwell) получено распределение индукционных токов на поверхности куттерного ножа с режущей кромкой, помещенного на плоский индуктор в трех вариантах расположения. Результаты моделирования напряженности магнитного поля ($H_{0,1}$), которые определялись на глубине 0,1 мм от поверхности режущего инструмента, показаны для вариантов расположения: кромка на краю — $1,703 \cdot 10^6$ А/м; кромка через середину — $2,793 \cdot 10^6$ А/м; кромка симметрично диаметра — $2,026 \cdot 10^6$ А/м. Анализ плотности вихревых токов ($J_{0,1}$) при магнитно-импульсной обработке на режущей кромке куттерного ножа по линии измерения 0,1 мм от его поверхности составил: кромка на краю — $0,979 \cdot 10^8$ А/м²; кромка через середину — $7,9 \cdot 10^8$ А/м²; кромка симметрично диаметра — $7,230 \cdot 10^8$ А/м². Определены оптимальные варианты расположения ножа на индукторе. Поскольку магнитно-импульсная обработка — процесс циклический, а результаты последующих циклов зависят от результата обработки предыдущими циклами, то вариант «кромка симметрично диаметра» расположением плоского ножа представляется более выгодным, так как остаточный объемный нагрев у такого варианта ожидается выше, чем у других вариантов взаимного расположения инструмента на индукторе.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка; 3D-моделирование; программное обеспечение ANSYS; индукционный ток; напряженность магнитного поля; плоский режущий инструмент; расположение изделия.

Рис. 11. Библиогр.: 4 назв.

A. N. Matsias¹,A. M. Miliukova², PhD in Technical Sciences, Associate Professor,V. V. Maleronok³, PhD in Technical Sciences, Associate Professor^{1,2}State Scientific Institution “Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”, 10 Academician Kuprevich Str., 220084 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 367 60 10, priemnaya@phti.by³Belarusian State Aviation Academy, 77 Uborevicha Str., 220096 Minsk, the Republic of Belarus

NUMERICAL SIMULATION OF HARDENING MAGNETIC-PULSE TREATMENT OF A FLAT CUTTING TOOL IN ANSYS AND DETERMINATION OF THE RELATIVE POSITION OF THE “INDUCTOR—PRODUCT” SYSTEM

The objective of the present research is to analyse the numerical simulation results of the hardening magnetic-pulse treatment process of a flat cutting tool using ANSYS software. The objective is to formulate pragmatic recommendations for the relative positioning of the treated product in relation to the inductor, with the aim of enhancing the effectiveness of the hardening process.

The distribution of induced currents on a cutter knife surface with a cutting edge placed on a flat inductor with three configurations of the edge position has been obtained using the Ansys Electronics Desktop (Maxwell) module. The simulation results of the magnetic field strength ($H_{0,1}$), which have been determined at a depth of 0.1 mm from the cutting tool surface, are shown for the following configurations: edge at the edge — $1.703 \cdot 10^6$ А/м; edge through the middle — $2.793 \cdot 10^6$ А/м; edge symmetrically to the diameter — $2.026 \cdot 10^6$ А/м. The analysis of the eddy current

density ($J_{0,1}$) during the magnetic-pulse treatment (MPT) on the cutting edge of the cutter knife along the measurement line of 0.1 mm from its surface is as follows: for the edge at the edge configuration — $0.979 \cdot 10^8 \text{ A / m}^2$; edge through the middle — $7.9 \cdot 10^8 \text{ A / m}^2$; edge symmetrical to the diameter — $7.230 \cdot 10^8 \text{ A / m}^2$. The optimal configurations of the knife position on the inductor have been determined: edge through the middle and edge symmetrical to the diameter. Given that MPT is a cyclic process, and the results of subsequent cycles are contingent on the outcomes of previous cycles, the configuration of the edge symmetrical to the diameter with the flat knife position appears to be more advantageous. This is due to the expectation that the residual volumetric heating for this configuration will exceed that of the other configurations for the mutual tool position on the inductor.

Key words: magnetic pulse treatment; 3D modeling; ANSYS software; induction current; magnetic field strength; flat cutting tool; product location.

Fig. 11. Ref.: 4 titles.

Введение. Практическое использование энергии импульсных электромагнитных полей открывает исключительные перспективы для создания новой и современной технологии по обработке изделий из различного рода сталей и сплавов.

Магнитно-импульсная обработка (далее — МИО) металлов характеризуется тем, что на деформируемую металлическую заготовку создается определенное давление непосредственно воздействием импульсного магнитного поля без участия промежуточных твердых, жидких или газообразных сред [1; 2].

В настоящее время существует широкая гамма оборудования для МИО, которое подразделяется на группы в зависимости от запасаемой энергии, частоты разряда и производительности. По конструктивному оформлению установки охватывают широкий диапазон применения, различаются незначительно. Однако по своим характеристикам (энергии, частоте, напряженности магнитного поля, длительности импульса) имеют отличия. По сравнению с установками для формообразования под действием импульсного магнитного поля для упрочнения используется оборудование с меньшей частотой и энергией воздействия, длительностью импульса и величиной напряженности магнитного поля [3].

Выбор того или иного метода магнитной обработки существенно зависит от обрабатываемого изделия: его размера, геометрических особенностей, марки стали, нагрузок, действующих на изделие в процессе работы, от конструктивного и технического исполнения установок для импульсной обработки.

Одной из основных проблем при упрочнении является подбор оптимальных режимов для выполнения обработки, поскольку он связан с проведением массы испытаний, при которых варьируются различные параметры процесса МИО: энергия импульса, ток разряда, размеры индуктора, количество импульсов и т. д. Это приводит к увеличению времени для исследований и определенных трудностей, связанных с задействованием производственных мощностей при проведении эксперимента. Кроме того, основываясь на ранее полученных результатах исследований в области МИО изделий, обрабатываемых на плоских индукторах, установлено, что эффект упрочнения зависит от взаимного расположения изделия относительно индуктора. Эта закономерность наблюдается в основном при обработке габаритных изделий, которые охватывают всю рабочую поверхность спирали индуктора. Как указывалось выше, экспериментально проверить данную теорию весьма затруднительно, поэтому необходимо прибегнуть к другому методу — моделированию.

Научно обоснованным решением является использование имитационного моделирования для оценки конструкторских решений и анализа результатов процессов упрочняющей МИО. Использование программного обеспечения ANSYS для технического анализа и численного моделирования позволяет получать количественные результаты изучаемых процессов, обеспечивает понимание физики моделируемых процессов, высокий уровень наглядности и т. д. [4].

Следовательно, основная цель моделирования — расширить понимание процесса МИО на примере плоского режущего инструмента, осуществить вариацию параметров моделирования и на начальной стадии разработать методику выбора оптимального взаимного расположения готового изделия по отношению к индуктору, чтобы повысить эффективность упрочнения методом МИО.

Материалы и методы исследования. В качестве основного технологического оборудования для проведения обработки и моделирования будет использоваться магнитно-импульсная установка (МИУ) МИП-18, изготовленная в государственном научном учреждении «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси».

Представленная установка характеризуется как высокоэнергетическая и высокоскоростная. Длительность единичного импульса магнитного поля при воздействии на образцы в установке находится в интервале от 35 до 200 мкс в зависимости от используемого типа индуктора. Максимальное амплитудное значение напряженности магнитного поля составляет порядка $1,7 \cdot 10^7$ А / м, что соответствует 21 Тл, энергии воздействия до 15 кДж.

Для исследований и обработки использовался плоский индуктор диаметром 150 мм с медной шиной и изоляционным слоем (при моделировании изолирующий слой был представлен воздушным промежутком). Число витков спирали индуктора составляло 18 шт., индуктивность — 25,8 мкГн, активное сопротивление — 4 мОм. В качестве обрабатываемого изделия использовался куттерный нож из коррозионностойкой стали 40Х13. Для проведения моделирования выполнено построение 3D-модели куттерного ножа, которая была импортирована из SolidWorks, а индуктор построен в блоке Maxwell. Моделирование проводилось в блоке Ansys Electronics Desktop (Maxwell) — модуль для электромагнитного анализа.

Активное сопротивление R и индуктивность L являются основными электрическими параметрами индуктора и исходными данными для моделирования, которые были получены при лабораторном измерении.

Также для проведения исследований был применен закон изменения напряжения при разряде конденсаторной батареи на индуктор по следующей формуле:

$$U = U_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t),$$

где U_0 — начальное амплитудное значение напряжения, В;

β — коэффициент затухания;

t — время моделирования, с;

ω — угловая частота, рад / с; $\omega = 2\pi f$, f — частота затухающих колебаний, Гц [4].

Начальное амплитудное значение напряжения $U_0 = 10\ 000$ В, согласно техническим характеристикам оборудования для энергии в 10 кДж (энергия обработки), является напряжением заряда конденсаторной батареи. Теоретическое значение коэффициента затухания β принимается равным отношению $R/2L$. Но это значение не учитывает потери энергии, связанные с рассеиванием магнитного потока и нагревом заготовки. В связи с этим значение коэффициента затухания было определено экспериментально и составило 2 000, чтобы получить один период (T) затухающих колебаний с ослаблением второй полуволны в 1,4...1,5 раза, как в реальных установках для МИУ. На рисунке 1 представлена измеренная осциллограмма разрядного импульса, содержащая один период затухающих колебаний. Разряд в индукторе измерялся поясом Роговского.

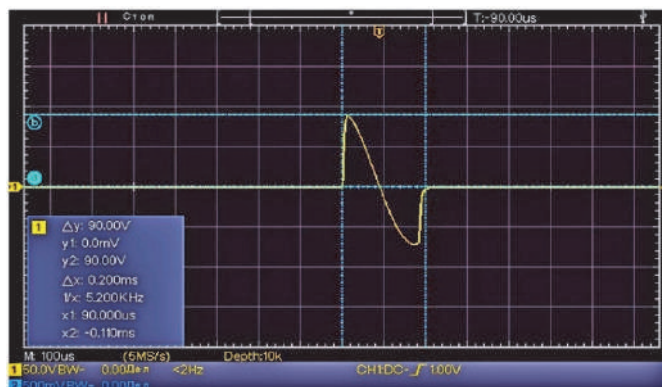


Рисунок 1. — Переходной процесс разряда в индукторе

Частота затухающих колебаний f зависит от конструктивных особенностей МИУ и используемого с ней индуктора. Так, установка МИП-18 с плоским индуктором диаметром 150 мм, согласно технической документации, работает на частоте 5,2 кГц.

Время моделирования t выбирается равным времени релаксации переходного процесса в цепи «конденсатор—индуктор—заготовка» с учетом аппаратной реализации исполнительного механизма разряда в виде разрядника и составляет один период, что обеспечивает достаточную для анализа точность результатов.

Разрядный ток индуктора при расположении на нем ножа рассчитывается в процессе моделирования, как и величина реактивного сопротивления индуктора на указанной частоте.

В результате моделирования получены характеристики переходного процесса разряда конденсатора на индуктор. Результаты представлены в виде графиков затухающих колебаний на рисунке 2.

Процесс затухания происходит за время T , что с учетом равенства $T = 1 / f$ при $f = 5,2$ кГц составляет 192 мкс, а максимальная величина силы тока в момент времени $T / 4 = 48$ мкс. В дальнейшем при моделировании расчет будет производиться для времени 45 мкс, так как шаг моделирования по времени выбран 5 мкс, что позволит сократить количество расчетных точек.

Отображение основных электромагнитных величин (H, J) будет приводиться для времени 45 мкс, где амплитуда разрядного тока максимальна и достигает 10,46 кА, следовательно, значения электромагнитных величин (H, J) будут максимальны.

Для дальнейшего проведения моделирования необходимо построить сетку ножа, индуктора и воздушного пространства по методу конечных элементов (рисунок 3).

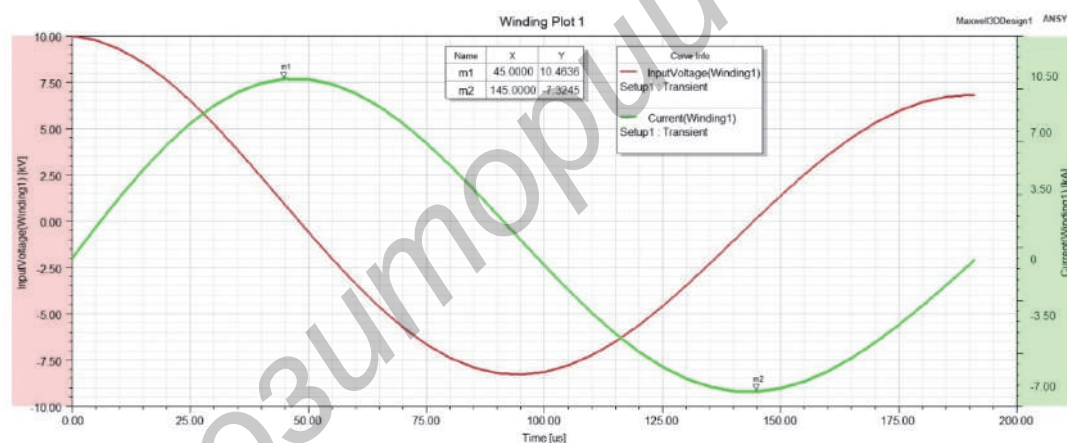


Рисунок 2. — Переходный процесс разряда индуктора, полученный в результате моделирования в виде графиков затухающих колебаний тока (I) и напряжения (U)

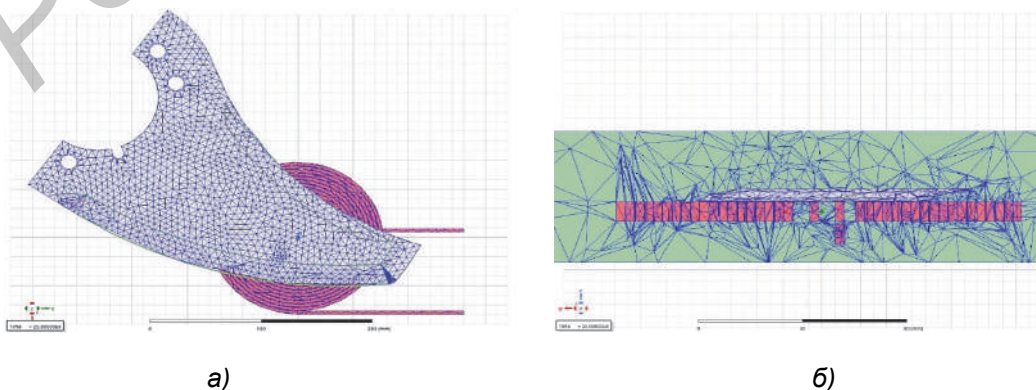


Рисунок 3. — Сетка ножа (а), индуктора и воздушного пространства (б)

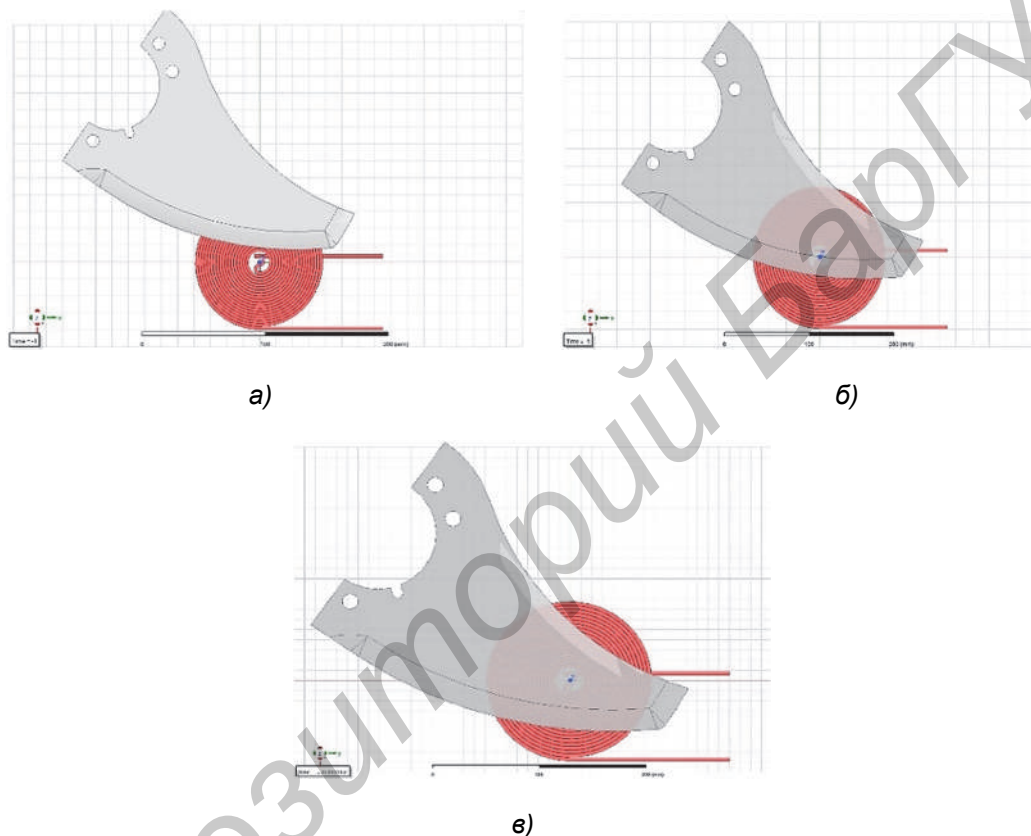
Результаты исследования и их обсуждение. Для исследований была принята компоновка, представленная на рисунке 4.

Рассмотрены три варианта взаимного расположения ножа относительно индуктора в целях установления наиболее энергетически выгодного магнитно-импульсного воздействия на обрабатываемое изделие.

Измерения напряженности проводили по пяти диаметральной линиям на высоте 0,1; 0,5; 1; 5; 10 мм от плоскости индуктора, как показано на рисунке 5.

Полученные графики распределения напряженности магнитного поля на различной глубине от плоскости индуктора представлены на рисунке 6.

Как видно из графика, по мере удаления от плоскости индуктора величина напряженности магнитного поля уменьшается, а максимум смещается к краю.



а — кромка на краю; б — кромка через середину; в — кромка симметрично диаметра

Рисунок 4. — Взаимное расположение изделия по отношению к спирали индуктора

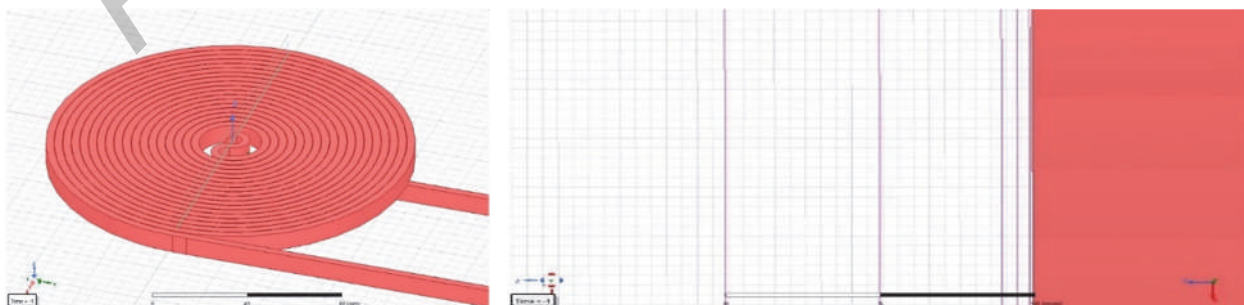


Рисунок 5. — Диаметральные линии на высоте 0,1; 0,5; 1; 5; 10 мм от плоскости индуктора

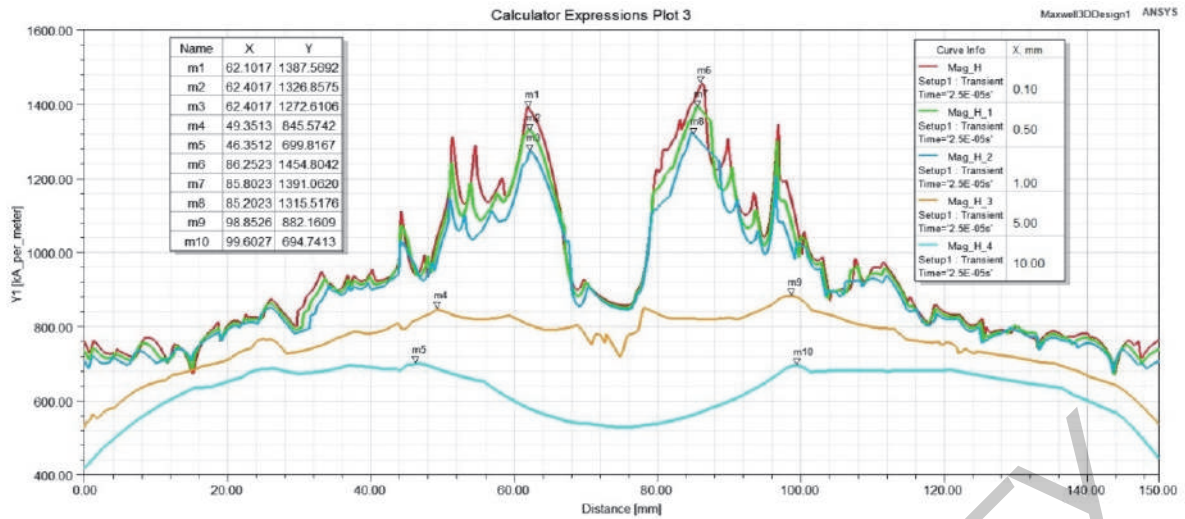


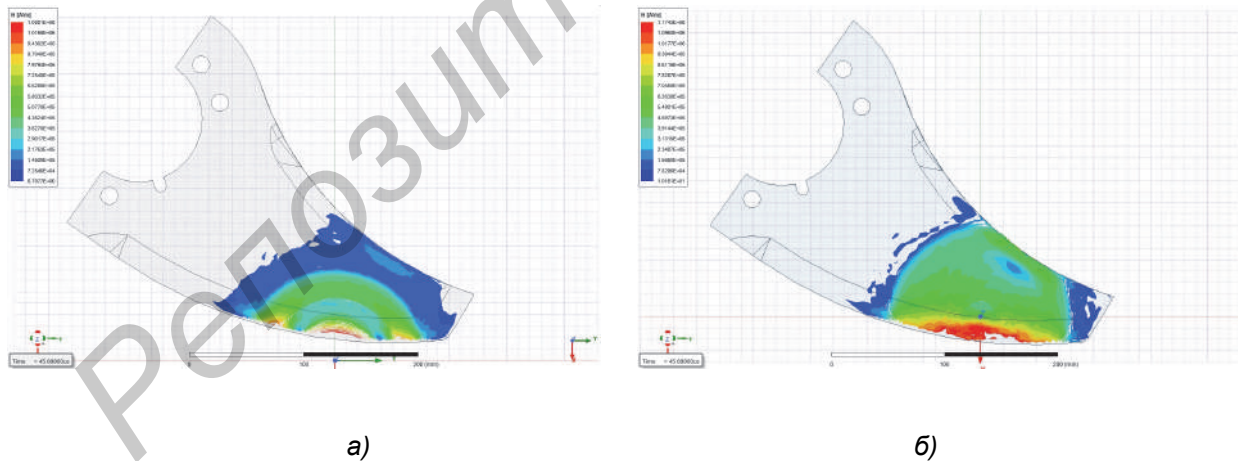
Рисунок 6. — Напряженность магнитного поля на высоте 0,1; 0,5; 1; 5; 10 мм от плоскости индуктора

В результате моделирования получены основные значения электромагнитных величин (H, J) для трех вариантов взаимного расположения индуктора и ножа.

Распределение электромагнитных величин (H, J) оценивалось по объему и сечению ножа, а численные значения — по диаметральной линии на глубине 0,1 мм от обрабатываемой поверхности ножа, которая находится непосредственно на индукторе. При всех исследованиях нож находился на высоте 0,5 мм над поверхностью индуктора, что соответствует толщине изоляции между индуктором и обрабатываемым изделием.

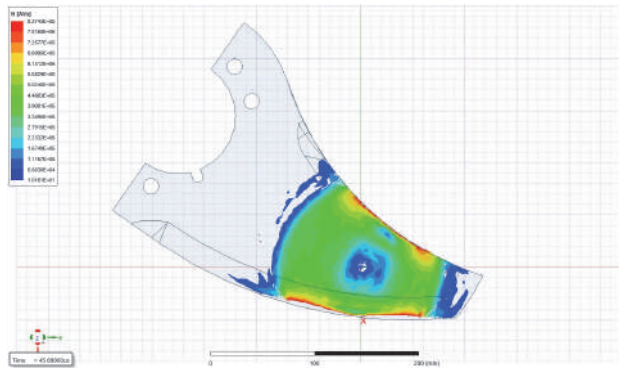
Распределение напряженности магнитного поля на исследуемом изделии представлено на рисунке 7.

Значения напряженности по линии измерения на глубине 0,1 мм от поверхности ножа представлены на рисунке 8.

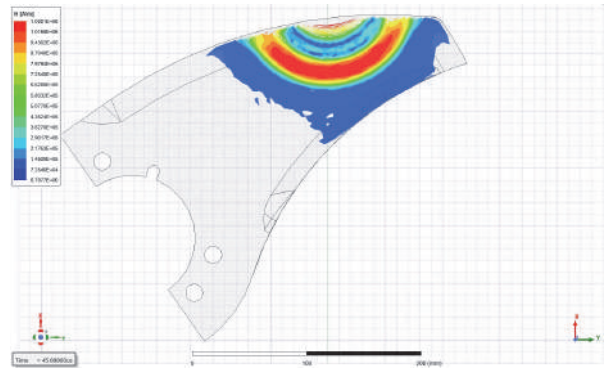


а — вид сверху, кромка на краю; б — вид сверху, кромка через середину; в — вид сверху, кромка симметрично диаметра; г — сторона ножа к индуктору, кромка на краю; д — сторона ножа к индуктору, кромка через середину; е — сторона ножа к индуктору, кромка симметрично диаметра; ж — сечение, кромка на краю; з — сечение, кромка через середину; и — сечение, кромка симметрично диаметра

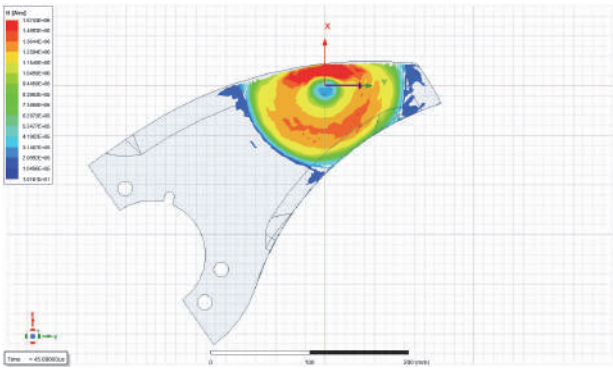
Рисунок 7. — Распределение напряженности магнитного поля на поверхности обрабатываемого изделия при различных вариантах расположения



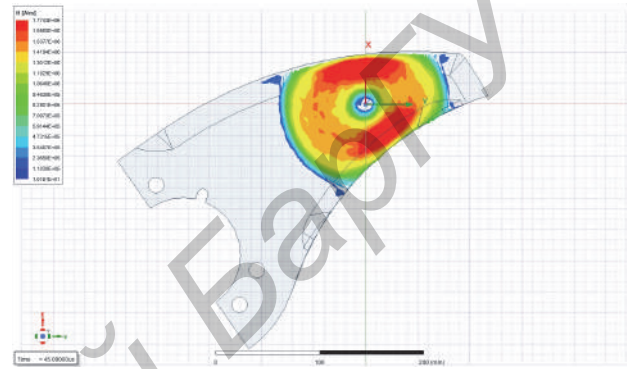
б)



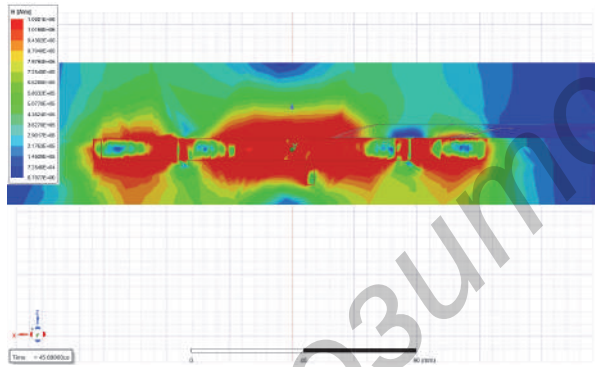
а)



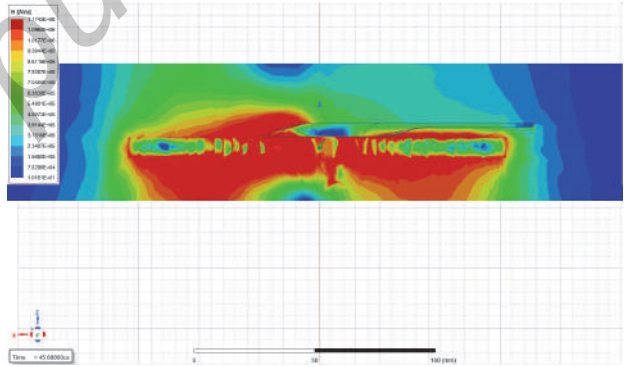
д)



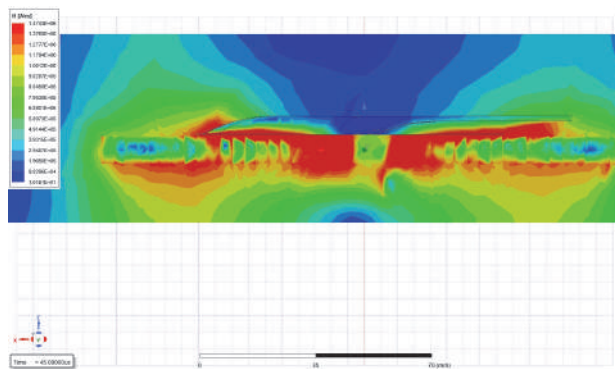
е)



ж)

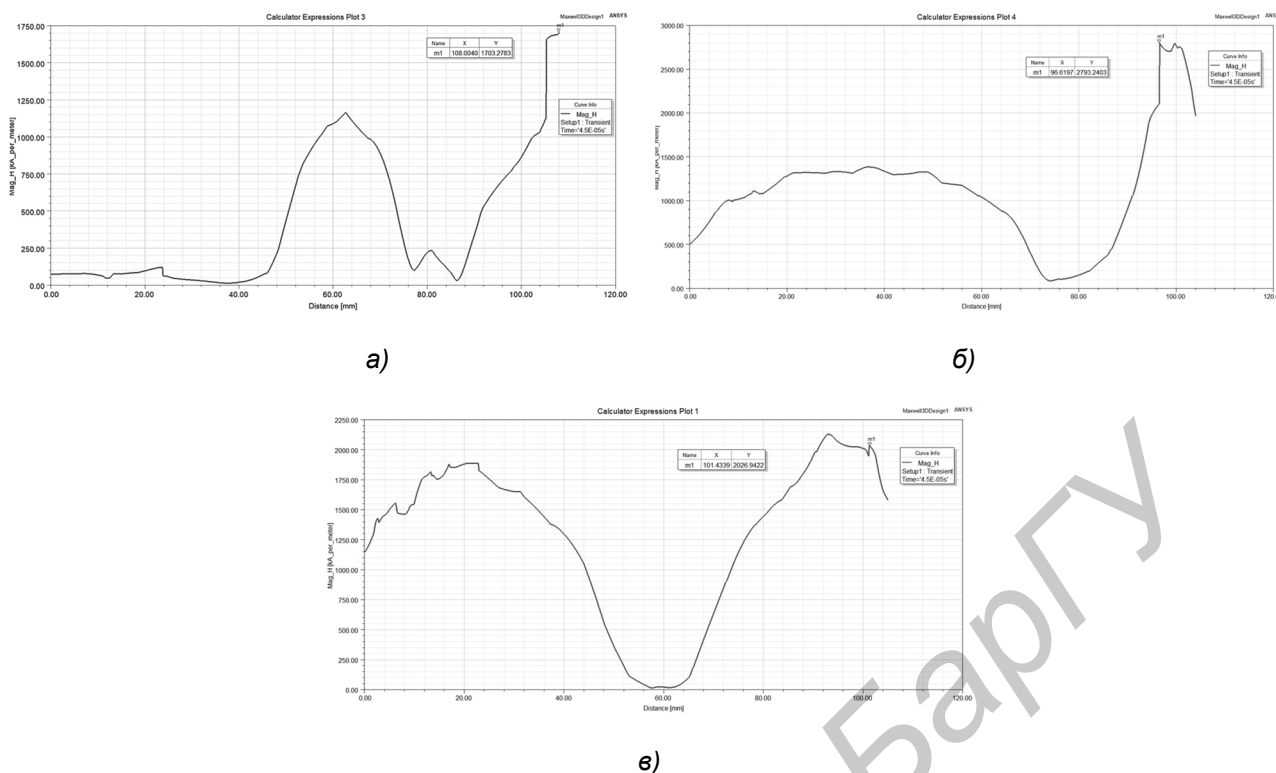


з)



и)

Рисунок 7. — Окончание



а — кромка на краю; б — кромка через середину; в — кромка симметрично диаметра

Рисунок 8. — Графики определения напряженности магнитного поля при различных вариантах расположения ножа по отношению к индуктору

Значения напряженности магнитного поля ($H_{0,1}$) при МИО на режущей кромке куттерного ножа по линии измерения 0,1 мм от его поверхности составили: кромка на краю — $1,703 \cdot 10^6$ А / м; кромка через середину — $2,793 \cdot 10^6$ А / м; кромка симметрично диаметра — $2,026 \cdot 10^6$ А / м.

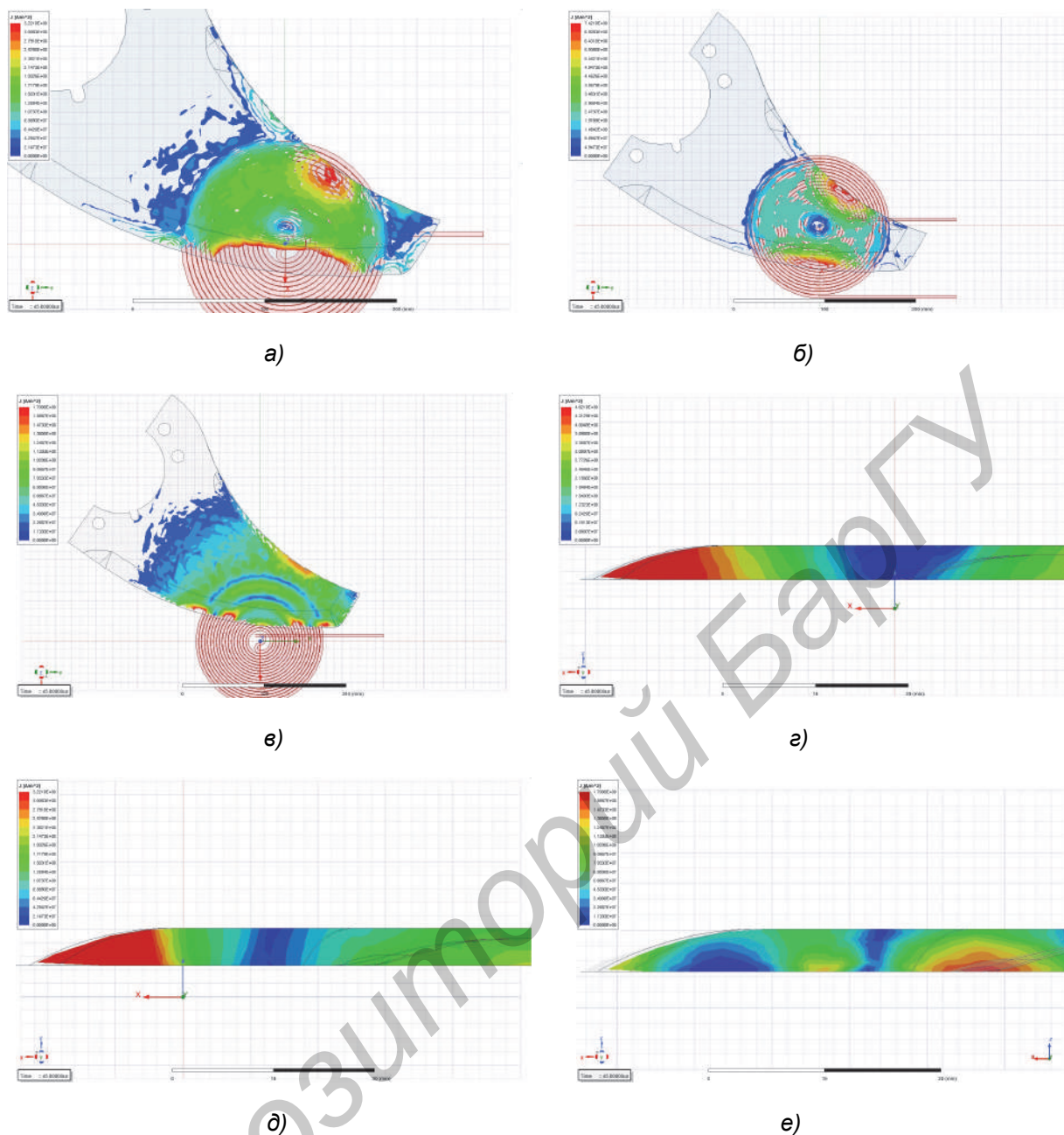
Таким образом, по графику, представленному на рисунке 8, можно сделать вывод, что значение напряженности, следовательно, и индукция больше у варианта «кромка через середину», однако, оценивая распределение напряженности по объему, видим, что у варианта «кромка через середину» наблюдается большая однородность магнитного поля по сравнению с остальными вариантами, что напрямую повлияет на распределение плотности вихревого индукционного тока.

Дальнейшим этапом исследования было определение распределения плотности вихревого тока при МИО (рисунок 9).

Значения плотности вихревого тока по линии измерения на глубине 0,1 мм от поверхности ножа представлены на рисунке 10.

Значения плотности вихревых токов ($J_{0,1}$) при МИО на режущей кромке куттерного ножа по линии измерения 0,1 мм от его поверхности составили: кромка с краю — $0,979 \cdot 10^8$ А / м²; кромка через середину — $7,9 \cdot 10^8$ А / м²; кромка симметрично диаметра — $7,230 \cdot 10^8$ А / м².

Полученные результаты свидетельствуют о том, что большее значение имеет величина плотности вихревого тока у варианта с установкой кромки через середину, однако у варианта расположения ножа «кромка симметрично диаметра» наблюдается распределение плотности вихревого индукционного тока с высоким порядком ее значения по максимальному объему обрабатываемой области инструмента (это видно по распределению плотности на объемных рисунках и из графика по площади, ограниченной им, особенно в области режущей кромки), чем у других вариантов взаимного расположения индуктора и изделия.

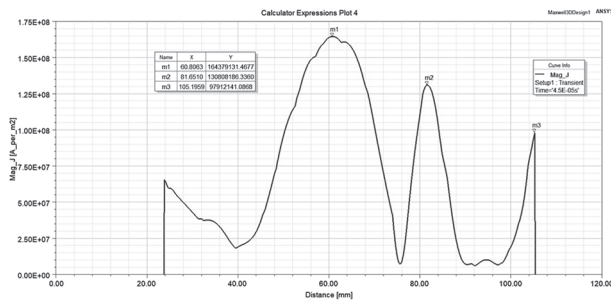


а — вид сверху, кромка на краю; б — вид сверху, кромка через середину; в — вид сверху, кромка симметрично диаметра; г — сечение, кромка на краю; д — сечение, кромка через середину; е — сечение, кромка симметрично диаметра

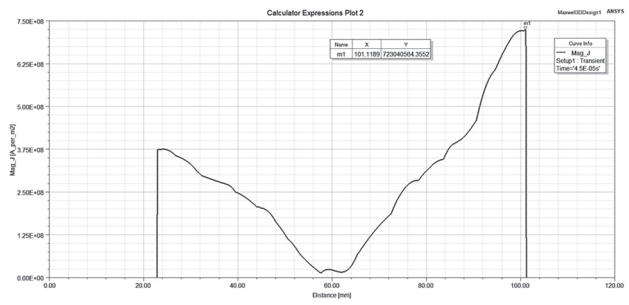
Рисунок 9. — Распределение плотности вихревого тока на поверхности обрабатываемого изделия при различных вариантах расположения

Вариант расположения ножа кромкой на краю является энергетически невыгодным и может быть применен только для локальной обработки или дополнительной обработки требуемого участка или узкого инструмента, который рекомендуется обрабатывать в цилиндрическом индукторе, когда расположение над зоной центрального отверстия индуктора, где напряженность поля минимальна, недопустимо, так как приведет к появлению большой необрабатываемой области.

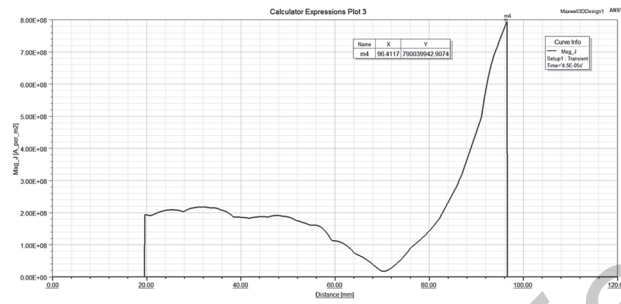
Такое распределение плотности вихревого индукционного тока объясняется тем, что при внесении ножа в импульсное электромагнитное поле индуктора его магнитопроводный материал выступает в качестве магнитопровода, при этом взаимное расположение изделия и индуктора сильно влияет на протекание образующегося вихревого индукционного тока, векторное изображение которого представлено на рисунке 11.



а)



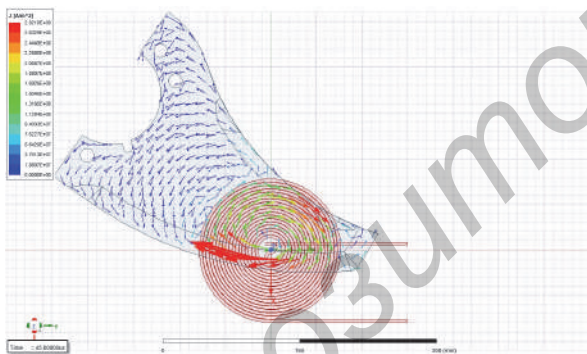
б)



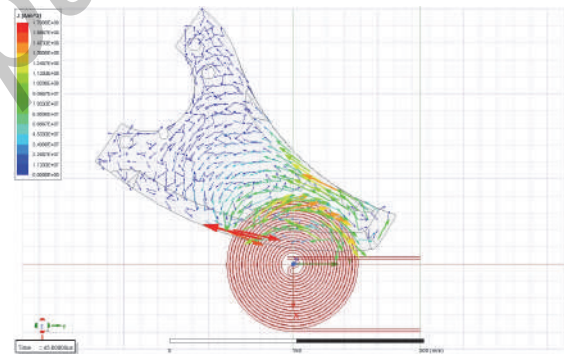
в)

а — кромка на краю; б — кромка через середину; в — кромка симметрично диаметра

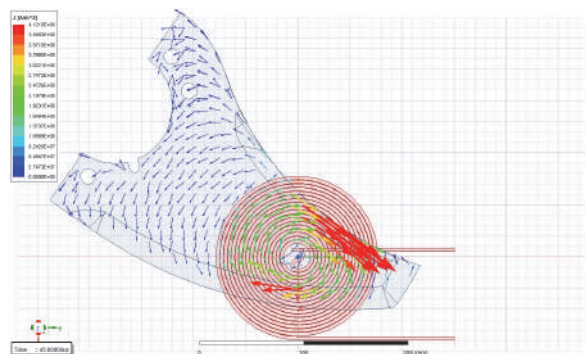
Рисунок 10. — Графики определения значения плотности вихревых токов при различных вариантах расположения ножа по отношению к индуктору



а)



б)



в)

а — кромка на краю; б — кромка через середину; в — кромка симметрично диаметра

Рисунок 11. — Векторное изображение силовых линий магнитного поля обрабатываемого изделия при различных вариантах расположения

Таким образом, по результатам проведенного численного моделирования можно сделать следующие выводы.

При расположении режущей кромки куттерного ножа на краю индуктора большая его часть оказывается вне зоны действия магнитного поля. При этом наблюдается сильная асимметрия в пути протекания индукционного тока, отличная от кольцевой (так как плоский индуктор имеет форму круга). Следовательно, происходит сильное ослабление вихревого индукционного тока.

При размещении режущей кромки через середину индуктора в первой трети витков большая часть изделия выступает в качестве концентратора магнитного поля с одной стороны от диаметральной линии индуктора, во второй трети происходит уменьшение площади магнитопровода, следовательно, уменьшение области замыкания кольцевых линий индукционного тока.

У варианта расположения ножа «кромка симметрично диаметра» с расположением кромки в первых двух третях витков от центра индуктора наблюдается образование симметричных кольцевых линий протекания вихревого индукционного тока (так как индуктор круглый плоский), следовательно, наблюдается равномерность огибания периметра изделия с одинаковым воздействием на большую обрабатываемую область.

Заключение. Для плоских изделий (в основном для режущих инструментов) определение эффективности МИО является достаточно трудоемкой вычислительной задачей. В результате проведенного численного моделирования влияния МИО на плоский куттерный нож были рассмотрены три варианта взаимного расположения индуктора и ножа в целях установления наиболее энергетически выгодного воздействия на обрабатываемое изделие.

Исследование напряженности магнитного поля ($H_{0,1}$) при МИО на режущей кромке куттерного ножа по линии измерения 0,1 мм от его поверхности показало, что значение больше у варианта «кромка через середину», однако, оценивая распределение напряженности по объему, можно заметить, что у варианта расположения ножа, где кромка расположена симметрично диаметра, наблюдается большая однородность магнитного поля по сравнению с остальными вариантами.

Полученные результаты величины плотности вихревого тока свидетельствуют о том, что большим значениям соответствует расположение ножа с установкой кромки через середину, однако у варианта диаметрально симметричного расположения ножа наблюдается распределение плотности вихревого индукционного тока с высоким порядком ее значения по максимальному объему обрабатываемой области инструмента. Такое распределение плотности вихревого индукционного тока объясняется тем, что при внесении ножа в импульсное электромагнитное поле индуктора его магнитопроводный материал выступает в качестве магнитопровода.

Следует отметить, что так как вихревой индукционный ток (показатели: сила и плотность тока) является генератором тепловой энергии в обрабатываемом изделии, то при моделировании тепловых процессов ожидается распределение температуры по объему инструмента пропорционально распределению плотности индукционного тока. Следовательно, ожидается более высокий локальный нагрев у варианта с расположением режущей кромки через середину индуктора в первой трети витков, а объемный нагрев — у варианта расположения ножа «кромка симметрично диаметра» с установкой кромки в первых двух третях витков индуктора.

Так как МИО — процесс циклический (итерационный), а результат последующих циклов зависит от результата обработки предыдущими циклами, то вариант с расположением ножа «кромка симметрично диаметра» представляется более выгодным, так как остаточный объемный нагрев у такого варианта ожидается выше, чем у других вариантов взаимного расположения индуктора и инструмента.

Список цитируемых источников

1. Драгобецкий, В. В. Новые и высокоэффективные технологии в машиностроении : учеб. пособие / В. В. Драгобецкий, А. Д. Коноваленко, В. Г. Загорянский. — Харьков : Точка, 2012. — 238 с.
2. Малыгин, Б. В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. — М. : Машиностроение, 1989. — 112 с.
3. Матяс, А. Н. Разработка экспериментального оборудования для нового метода магнитно-импульсной обработки с независимым регулированием длительности импульса / А. Н. Матяс, А. А. Лях. — Вестник БарГУ. Серия «Технические науки». — 2023. — № 2 (14). — С. 16—27.
4. Малеронок, В. В. Численное моделирование процесса магнитно-импульсной обработки осевого режущего инструмента в Ansys / В. В. Малеронок, Д. А. Ционенко, А. В. Алифанов // Доклады Национальной академии наук Беларуси. — 2022. — Т. 66, № 2. — С. 237—246.

Поступила в редакцию 08.04.2025.

Репозиторий БарГУ