

Повышение температуры на 20—30 °С способствует увеличению твердости и глубины диффузионного слоя стали 40ХН2МА. Данное повышение температуры возможно ввиду того, что температура отпуска должна на 50—100 °С превышать максимальную температуру ионного азотирования (для данной стали отпуск составляет 620 °С).

Время ионного азотирования при низкой температуре (500—520 °С) практически не влияет на размер, форму и плотность распределения нитридной фазы. При повышении температуры до 540 °С увеличение времени азотирования оказывает значительное влияние на размер нитридной фазы и структуру матрицы. Размер нитридной зоны увеличивается, а плотность распределения выделившихся частиц уменьшается [3].

**Заключение.** Повышение микротвердости и глубины диффузионного слоя было достигнуто изменением состава рабочих газов, изменением температуры, времени выдержки. Следует сделать вывод о преимуществах второй методики в сравнении с первой ввиду значительного увеличения микро-твердости (на 20 %) и глубины (в 5 раз) азотированного слоя при увеличении времени выдержки на 50 % и изменении состава рабочих газов.

#### Список использованных источников

1. Ионно-плазменное азотирование как один из современных методов поверхностного упрочнения материалов : дис. / Т. П. Говорун [и др.] — Изд-во СумГУ. — 2011.
2. Босьяков, М. Н. Выбор режима упрочняющей обработки на установках ионного азотирования промышленного типа / М. Н. Босьяков, А. Н. Моисеенко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы VIII МНТК. — Минск : ФТИ НАН Беларуси. — 2016. — С. 50—58.
3. Будилов, В. В. Технология ионного азотирования в тлеющем разряде с полым катодом / В. В. Будилов, Р. Д. Агзамов, К. Н. Рамазанов // МиТОМ. — 2007. — № 7

УДК 004.94; 621.373

**В. В. Малеронок<sup>1</sup>, А. В. Алифанов<sup>2</sup>, И. А. Богданович<sup>2</sup>**

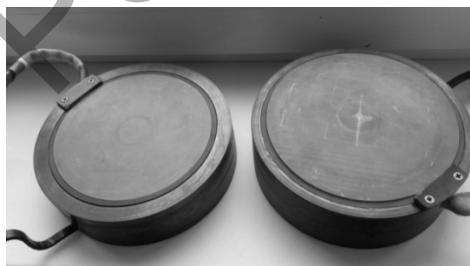
<sup>1</sup> Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь

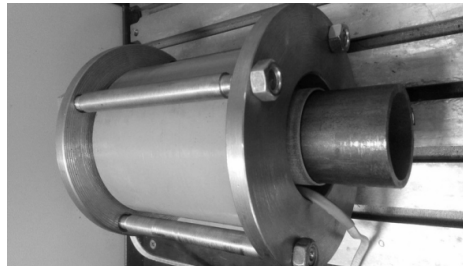
## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ В СРЕДЕ ANSYS

**Введение.** Магнитно-импульсная обработка (далее — МИО) является инновационным методом модификации поверхностных слоев инструментов и деталей машин. Хотя воздействие магнитным полем на изделия и расплавы известно еще в 60—80 годах, а отдельные примеры можно встретить и в патентах 40-х годов [1]. Современным и инновационным методом МИО делают подходы ученых (с 2000-х годов) к изучению механизмов упрочнения, улучшения физико-механических свойств, формообразования и других протекающих процессов в иных областях производства (деревообрабатывающей, авиастроении) [2—4]. Что позволяет оптимизировать режимы обработки и вносить эффективные конструкторские решения. Однако, это приводит к росту трудозатрат и задействованию производственных мощностей при проведении масштабного эксперимента. Экономически выгодным и научно обоснованным решением является использование имитационного моделирования для оценки конструкторских решений и анализа результатов процессов обработки. Так для моделирования МИО и последующей оценки эффективности конструкторских решений используется пакет программных модулей ANSYS, который прошел многократную верификацию в различных областях производства (машиностроение, авиастроение, материаловедение, акустика и т. д.) [5].

**Основная часть.** Рабочим органом установок для магнитно-импульсной обработки является индуктор (плоской или цилиндрической формы) (рисунок 1).



а)



б)

Рисунок 1 — Индукторы для установок МИУ: а — плоский; б — цилиндрический

Расчет конструкции и анализ эффективности индуктора напрямую влияют на качество МИО инструментов и деталей машин.

Намотка цилиндрических индукторов выполняется по спирали из медной шины прямоугольного сечения на ребро с расстоянием между витками равным толщине изоляции. Так для намотки индуктора с внутренним диаметром 13 мм и длиной рабочей зоны 60 мм использовалась прямоугольная медная шина сечением 3 × 6 мм с изолирующим слоем 0,25 мм (рисунок 2).

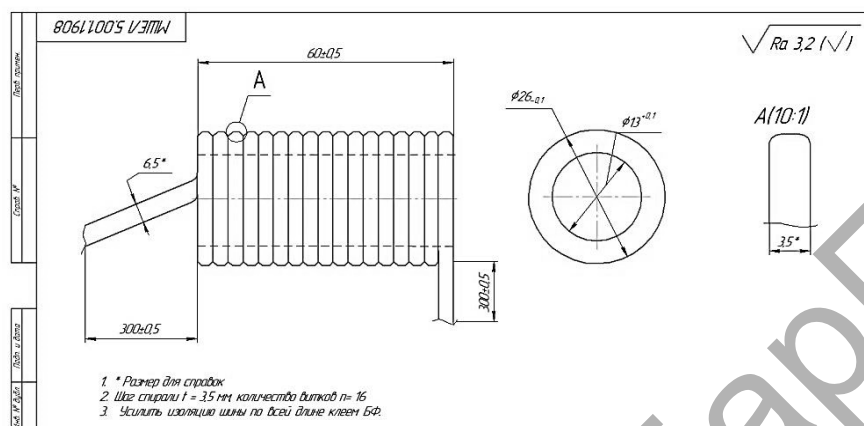


Рисунок 2 — Шина сечением 3 × 6 мм (3,5 × 6,5 мм с изоляцией) для индуктора 13 × 60 мм, согласно конструкторской документации

Такой способ намотки позволяет повысить плотность витков (число витков на единицу длины, определяемое по формуле

$$n = \frac{N}{l}, \quad (1)$$

где  $l$  — длина индуктора;

$N$  — количество витков.

При необходимой длине рабочей зоны 60 мм прямоугольное сечение шины 3 × 6 мм (площадь 18 мм<sup>2</sup>) позволяет намотать 16 витков, а при круглом сечении шины (радиус 2,4 мм), такой же площади сечения, позволяет намотать 11 витков (рисунок 3).

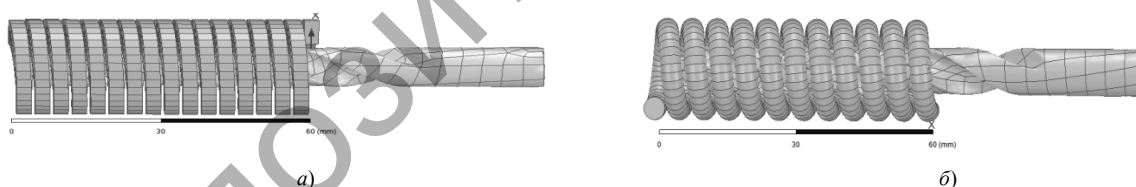


Рисунок 3 — Шина (моделирование без изоляции с расстоянием между витками равным толщине изоляции):  
а — прямоугольного сечения 3 × 6 мм; б — круглого сечения (радиус 2,4 мм) с равной площадью сечения

Повышение плотности намотки витков по закону Био-Савара-Лапласа приведет к увеличению напряженности магнитного поля для индуктора с прямоугольным сечением шины (рисунок 4).

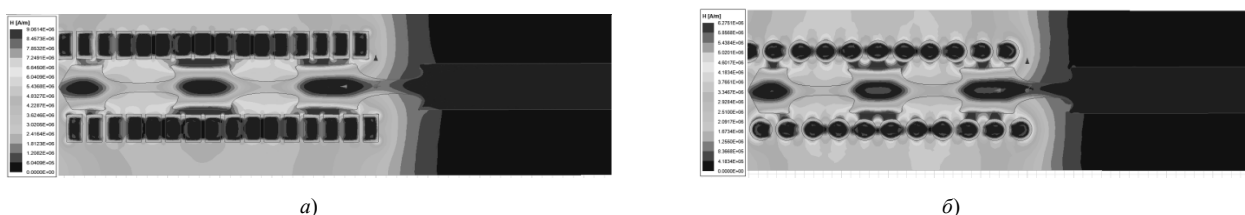


Рисунок 4. — Напряженность магнитного поля: а — при прямоугольном сечении шины (16 витков); б — при круглом сечении шины (11 витков)

В частном случае, в середине индуктора, где магнитное поле максимально, выражение для напряженности будет иметь вид [6]

$$H_{max} = \frac{n \cdot I \cdot l}{\sqrt{4r^2 + l^2}}, \quad (2)$$

где  $n$  — плотность витков (число витков на единицу длины)  $N/l$ ;  
 $I$  — сила тока;  
 $l$  — длина индуктора;  
 $r$  — радиус индуктора.

Следовательно, в середине индуктора будет более высокая интенсивность и плотность обработки боковой поверхности обрабатываемой детали. Однако, например, режущие кромки сверла, находящиеся в торцевой части, будут обрабатываться плохо в силу особенностей распространения магнитного поля.

С целью повышения эффективности процесса МИО, в отношении режущих кромок инструмента с переменным профилем поверхности, можно предусмотреть применение специальных индукторов (рисунок 5).

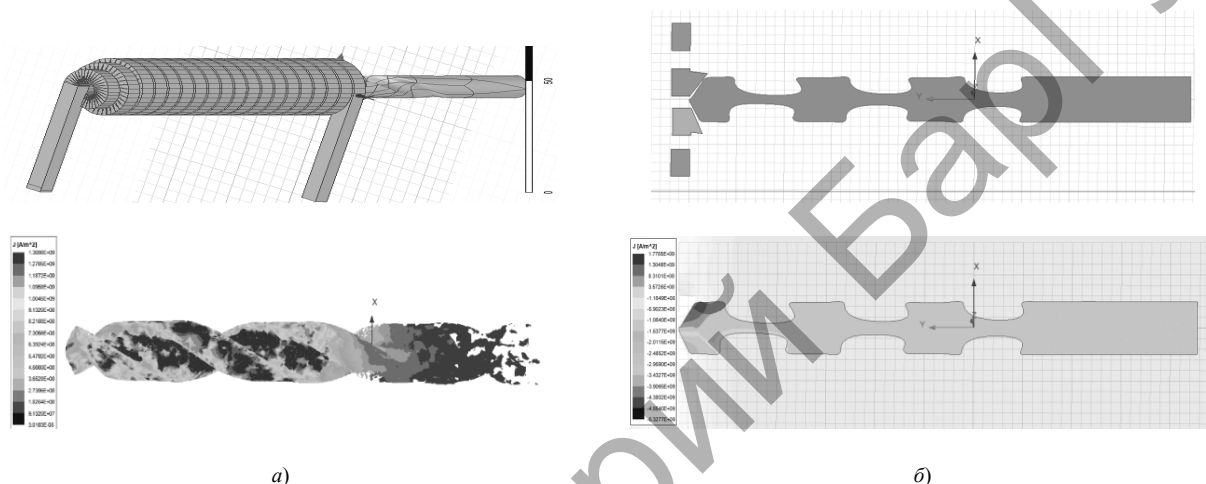


Рисунок 5 — Варианты индукторов для более эффективной МИО режущих кромок: *а* — цилиндрический индуктор с торцевыми витками меньшего диаметра, *б* — плоский индуктор, имеющий форму сечения витка, повторяющую угол заточки инструмента

Такой подход позволяет более эффективно обрабатывать режущие кромки инструмента (например, сверл), однако требует изготовления новой оснастки и индукторов.

**Заключение.** Рассмотрены способы повышения эффективности магнитно-импульсной обработки за счет применения шин для индукторов с плоским сечением проводника, а также предложены варианты особого способа намотки: цилиндрический индуктор с торцевыми витками меньшего диаметра; плоский индуктор, имеющий форму сечения витка, повторяющую угол заточки инструмента.

#### Список использованных источников

1. Кнопфель, Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. Методы генерации и физические эффекты, связанные с созданием импульсных полей мегаэрстедного диапазона / Г. Кнопфель ; перевод с английского Ф.А. Николаева, Ю.П. Свириденко. — М : Мир, 1972. — 392 с.
2. Алифанов, А. В. Технология упрочнения режущего инструмента импульсным магнитным полем / А. В. Алифанов, Н. В. Бурносов, И. Л. Чудакова // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: материалы VI Междунар. евраз. симп., Екатеринбург, 17—20 мая 2011 г. / Урал. гос. лес. тех. ун-т ; редкол.: В.Г. Новоселов [и др.]. — Екатеринбург, 2011. — С. 255—260.
3. Козлюк, А. Ю. Повышение стойкости режущего инструмента путем комбинированной магнитно-импульсной обработки : дис. кандидата тех. наук : 28.06.07 / А.Ю. Козлюк — Барнаул, 2007. — 122 л.
4. Орлов, А. С. Повышение износостойкости сверл методом импульсной магнитной обработки / А.С. Орлов, В.А. Полетаев // Вестник ИГЭУ. — 2007. — №3. — С. 54—55.
5. Ansys [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ansys.com>. — Дата доступа: 1.03.2022.
6. Зисман, Г. А. Курс общей физики : учеб. пособие : в 3 т. / Г.А. Зисман, О.М. Тодес. — 7-е изд., стер. — СПб. : Лань, [б. г.]. — Т. 2 : Колебания и волны — 2007. — 340 с.