

УДК 621.98.044.7

**А. И. Горчанин, А. М. Милокова, А. А. Лях**

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 369 85 52, annart@mail.ru

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НОЖЕЙ СО СЛОЖНЫМ ПРОФИЛЕМ ЛЕЗВИЯ

Исследовано влияние магнитно-импульсной обработки на качество упрочнения поверхности ножей с использованием различных индукторов. В целях повышения эффективности магнитно-импульсного упрочнения разработан индуктор с концентратором. Использование концентратора повышает плотность воздействия концентрированного потока энергии на упрочняемые поверхности инструмента со сложным профилем лезвия.

**Ключевые слова:** упрочнение; магнитно-импульсная обработка; сложнопрофильный нож; индуктор; концентратор энергии.

Рис. 8. Библиогр.: 9 назв.

**A. I. Harchanin, A. M. Miliukova, A. A. Lyah**

Physical-and-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevich Str., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 369 85 52, annart@mail.ru

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE HARDENING MAGNETIC-PULSE PROCESSING OF BLADES WITH A COMPLEX BLADE PROFILE

The impact of magnetic-pulse processing on the quality of hardening of the surface of knives using different inductors has been studied. In order to improve the efficiency of magnetic-pulse hardening, a set of technological equipment with a concentrator was developed. The use of concentrator increases the density of the impact of the concentrated energy flow on the hardened surface of the tool with a complex blade profile.

**Key words:** hardening; magnetic-pulse processing; complex profile knife; inductor; energy hub.

Fig. 8. Ref.: 9 titles.

**Введение.** Воздействие внешнего импульсного магнитного поля на поверхность стального изделия влияет на термодинамику, механизм и кинетику фазовых переходов структуры стали и приводит, в частности, к получению мелкодисперсной структуры на поверхности образца. При этом устойчивые изменения структуры приводят к улучшению эксплуатационных свойств изделий, в частности, повышению износостойкости [1; 2].

При магнитно-импульсной обработке (далее — МИО) внешней поверхности стального изделия, используется специальный индуктор [3]. Токопроводящее изделие помещается внутрь цилиндрического индуктора, и в нем возникает индукционный ток, пропорциональный скорости изменения магнитного потока через площадь его сечения в плоскости, перпендикулярной оси системы «индуктор—изделие», при возбуждении импульса электрического тока в индукторе. Магнитное поле индукционного тока направлено таким образом, чтобы уменьшить изменение магнитного потока, создаваемого током индуктора. В результате возникает разность плотностей энергии магнитного поля внутри изделия и вблизи поверхности [4; 5].

В лаборатории объемных гетерогенных систем Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси разработали технологию упрочнения магнитно-импульсной обработкой (МИО) сложнопрофильных ножей для резки сахарной свеклы (СТ СЭВ 4399) в целях повышения их эксплуатационных характеристик. Немецкие ножи фирмы Putsch, применяемые на отечественных комбинатах сахарной отрасли, имеют сложную конструкцию с зигзагообразной режущей кромкой лезвия (рисунок 1).



Рисунок 1. — Нож для резки сахарной свеклы

Их изготавливают путем фрезерования или штамповки заготовок из углеродистых и инструментальных сталей. На качество получаемой свекольной стружки в основном влияет острота режущей кромки лезвия ножей, характеризующаяся радиусом их округления. С увеличением радиуса округления режущих кромок, т. е. их износа, возрастают отрицательные значения переднего и заднего углов, увеличивается сила резания, особенно радиальная ее составляющая, и ухудшается качество свекольной стружки, что снижает количество получаемого из нее сахара. В процессе эксплуатации затупленные ножи регулярно (1 раз в смену) меняются на переточенные. Некоторые ножи восстанавливаются до 5 раз на правильных и заточных станках, что продлевает временной ресурс их эксплуатации [6].

**Основная часть. Разработка комплекта технологической оснастки для магнитно-импульсной обработки.** С целью повышения эффективности упрочнения сложнопрофильных стальных ножей для резки сахарной свеклы на экспериментальной магнитно-импульсной установке МИУ-3 (рисунок 2, а) МИО проводили с последовательным использованием цилиндрического и плоского индукторов (см. рисунок 2, б) при различных технологических режимах (энергии 8 кДж и длительности магнитно-импульсного воздействия до 200 мкс за несколько импульсов) [7; 8].



а)



б)

Рисунок 2. — Магнитно-импульсная установка МИУ-3 (а) и технологическая оснастка (б), состоящая из цилиндрического и плоского индукторов

Последовательная комбинированная обработка на двух индукторах (цилиндрическом и плоском) позволила упрочнить не только режущие кромки лезвий ножей, но и поверхности, на которых формируются эти лезвия, что увеличило период стойкости ножа во время испытаний в производственных условиях. Это объясняется тем, что в процессе резания свеклы происходит самозатачивание лезвия: упрочненный слой стачивается медленнее, чем неупрочненный.

Металлографические исследования образцов после комбинированной МИО показали, что поверхностный слой исследуемых ножей имеет однородную мелкозернистую структуру троосто-сорбита с упрочненным поверхностным слоем глубиной 40...60 мкм (рисунок 3) [7].

Как видно из рисунка 3, создана градиентная структура с упрочнением лишь поверхности рабочих режущих кромок, а внутренняя сердцевина ножа сохранила свои свойства с бейнитно-трооститной структурой. Такая структура обеспечивает одновременно высокую твердость и пластичность, необходимые для ножей, работающих в условиях циклических ударных нагрузок.

В результате комбинированной обработки период стойкости ножей увеличился в 1,8 раза, что позволяет рекомендовать применение упрочняющей МИО в операциях восстановления инструмента на предприятиях сахарной отрасли пищевой промышленности [8].

Однако данный комбинированный метод имеет такой недостаток, как низкая производительность: поскольку нож не помещается в индукторы полностью, его необходимо обрабатывать за несколько проходов и с двух сторон. Замена индукторов в МИУ-3 и повторная обработка занимает много времени. Кроме этого, при большом зазоре между обрабатываемой поверхностью ножа и спиралью индуктора снижается эффективность упрочнения. Известно, что при МИО стальных изделий наиболее эффективно обрабатывается поверхность изделий, которая находится на минимальном расстоянии (до 1...5 мм) от спирали индуктора [4].

На основе литературных данных [9] выявлены технологии, использующие для высокоэнергетической обработки профильных изделий промежуточные элементы в виде твердотельных концентраторов, усиливающих воздействие МИО, что привело к созданию практически новых технологий и оборудования, в основном в области изготовления различных машиностроительных изделий (методами обжима, раздачи, листовой штамповки, сварки и т. д.).

При осуществлении МИО индуктор должен обеспечивать следующие характеристики: высокий коэффициент преобразования энергии емкостного накопителя в работу по упрочнению изделия; высокую механическую стойкость к воздействию динамических усилий, возникающих в процессе МИО; оптимальную частоту разрядного тока; требуемое распределение или концентрацию магнитного поля на заданном участке обрабатываемого изделия; стойкость к электрическим перенапряжениям; надежное присоединение к выводам МИУ.

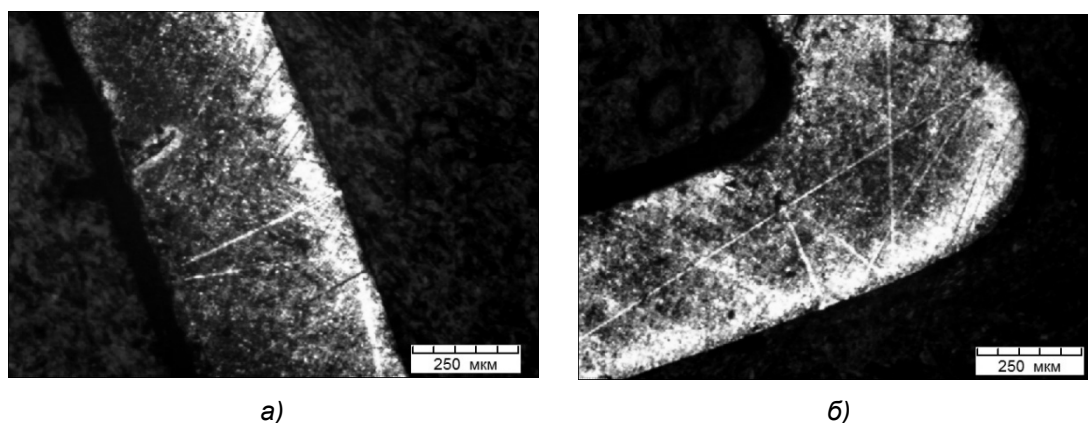


Рисунок 3. — Микроструктура ножа после МИО: поверхность режущей кромки лезвия ножа (а); вершина угла режущей кромки ножа (б)

В данной работе было принято решение использовать индуктор с концентратором энергии в целях повышения эффективности упрочняющего воздействия МИО на сложно-профильные ножи.

Теоретический анализ позволил установить, что использование концентратора значительно уменьшает энергию воздействия магнитного поля, но при этом растет плотность воздействия концентрированного потока энергии на упрочняемые поверхности профильного инструмента. Поэтому при разработке конструкции концентратора необходимо определить главные размеры индуктора  $D_n$ ,  $d_n$ , число витков в пазу  $\omega_n$ , сечение обмоточного провода, рабочее напряжение и энергию, используемые для упрочнения, наилучшее положение инструмента и его упрочняемых поверхностей относительно концентрированного потока энергии [9]. При этом форма прорези на верхней плоскости концентратора точно копирует зигзагообразную форму режущей кромки ножа.

Представим один из вариантов предлагаемой конструкции (рисунок 4). Индуктор состоит из рабочей части в виде медного концентратора с отверстием сложной зигзагообразной формы по диаметру, равному ширине ножа. Концентратор вставляется внутрь спирали индуктора. Для защиты и фиксации рабочей части индуктора используется изолятор, повторяющий диаметрально форму спирали индуктора. Корпус индуктора, выполненный из стали, обеспечивает фиксацию всех частей индуктора в процессе эксплуатации.

Устройство работает следующим образом. Медная спираль индуктора подключается к электрическим выводам магнитно-импульсной установки, на панели управления которой задается режим и время обработки. Режущая кромка ножа устанавливается в паз медного концентратора на необходимую глубину (15...20 мм). При упрочняющей обработке импульс энергии от спирали индуктора передается на концентратор, который в соответствии с формой передает плотный поток энергии на заданную поверхность ножа.

Однако разработка и изготовление такой конструкции оказалось довольно сложной и дорогостоящей задачей, поэтому для проведения экспериментов с использованием концентратора было принято решение разработать и изготовить упрощенный опытный образец концентратора для обработки цилиндрических стальных образцов. При проектировании концентратора разработана 3D-модель концентратора (рисунок 5) для имеющегося цилиндрического индуктора с внутренним рабочим диаметром 63 мм.

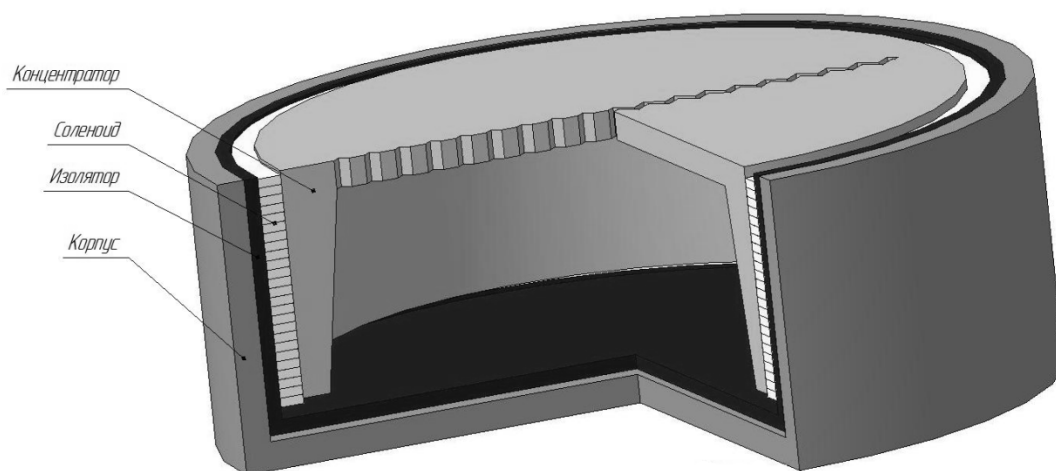


Рисунок 4. — Эскиз экспериментального индуктора с концентратором

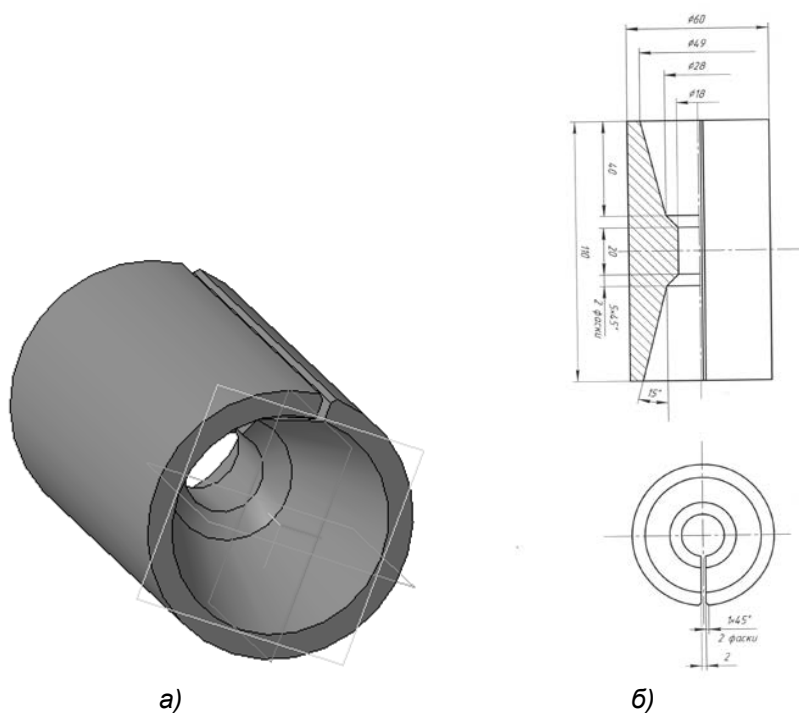


Рисунок 5. — Конструкция цилиндрического концентратора: 3D-модель (а); эскиз (б)



Рисунок 6. — Медный концентратор энергии



Рисунок 7. — Система «концентратор—индуктор—образец»

Экспериментальный концентратор (рисунок 6) изготовили из медного прутка диаметром 60 мм, длиной 110 мм. В соответствии с чертежом, в середине просверлили отверстие диаметром 18 мм, после чего с помощью токарной обработки проделали конические отверстия с углом при вершине  $30^\circ$  на глубину 40 мм с двух сторон, а также сняли фаски под углом в  $45^\circ$ ; сквозной паз предусмотрен для того, чтобы концентратор не был коротко замкнутым (см. рисунок 6).

Концентратор через изоляцию устанавливается в цилиндрический индуктор. Обрабатываемые стальные образцы при обработке также необходимо изолировать (рисунок 7).

Таким образом, разработана технологическая оснастка для повышения производительности и эффективности магнитно-импульсного упрочнения инструмента со сложным профилем режущей кромки для сахарной отрасли промышленности.

**Заключение.** Предложен усовершенствованный способ упрочнения инструмента со сложным профилем режущей кромки, например ножей для резки сахарной свеклы, включающий применение в процессе МИО специальных концентраторов, причем форма рабочей части концентратора должна полностью соответствовать форме упрочняемых поверхностей.

#### Список цитируемых источников

1. *Бернштейн, М. Л.* Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле / М. Л. Бернштейн, В. Н. Пустовойт. — М. : Машиностроение, 1987. — 255 с.
2. *Малыгин, Б. В.* Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин / Б. В. Малыгин. — М. : Машиностроение, 1998. — 130 с.
3. Индуктор для магнитно-импульсной обработки : пат. на полезную модель № 10603 U РБ от 30.04.2015 МПК (2006.01) С 21D 10/00, В 23P 15/00 / А. В. Алифанов, А. А. Лях, А. М. Милокова, В. Н. Шишмолин, А. А. Демянчик, Ж. А. Попова ; заявитель «Физико-технический институт НАН Беларуси». Заявка № 420140290 от 07.08.2014 г. // Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. Афіц. бюл. — 2015. — № 2. — С. 125.
4. *Алифанов, А. В.* Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения стальных изделий, расчет индукторов и параметров процесса / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милокова // Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В. В. Клубовича. — Витебск : ВГТУ, 2017. — Гл. 13. — С. 31—52.
5. *Алифанов, А. В.* Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милокова, Н. М. Ционенко // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. — 2016. — № 4. — С. 31—36.
6. Повышение износостойкости ножей для резки сахарной свеклы методами высокоэнергетической обработки / А. В. Алифанов [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы XI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 14—16 сент. 2016 г. : в 3 кн. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2016. — Кн. 2. — С. 4—10.
7. *Горчанин, А. И.* Влияние магнитно-импульсной обработки на структуру и свойства сложнопрофильного режущего инструмента / А. И. Горчанин, А. М. Милокова // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13—15 сент. 2017 г. : в 3 кн. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2017. — Кн. 2. — С. 48—53.
8. *Милокова, А. М.* Магнитно-импульсная обработка поверхности металлических изделий / А. М. Милокова, А. И. Горчанин // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : материалы 32-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 5 апр. 2017 г. — Минск : БНТУ, 2017. — С. 163—165.
9. *Белый, И. В.* Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И. В. Белый, С. М. Фертик, Л. Т. Хименко. — Харьков : Вища шк., 1977. — 168 с.

Данная работа была выполнена в соответствии с Грантом Национальной академии наук Беларуси для аспирантов в рамках договора № 2018-26-029.

Поступил в редакцию 30.05.2019