

ОБЩЕИНЖЕНЕРНЫЕ ВОПРОСЫ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

УДК 621.98

А. В. Алифанов, д-р техн. наук (ФТИ НАН Беларуси);
А. А. Лях, инженер (ФТИ НАН Беларуси);
И. Л. Бокун, аспирант (ФТИ НАН Беларуси);
Н. В. Бурносков, канд. техн. наук (БГТУ)

МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО КОНЦЕВОГО ИНСТРУМЕНТА

Магнитно-импульсное оборудование для упрочнения металлических изделий (например, сферической или продолговатой цилиндрической формы) состоит из емкостного накопителя, зарядного устройства, устройства поджига, устройства управления зарядом, устройства управления зарядом, устройства управления, специального инструмента (индуктора) для обработки изделий импульсным магнитным полем и устройства для автоматической подачи изделий в зону обработки (индуктор). В статье раскрывается сущность механизма упрочняющего воздействия электромагнитного поля на металлические изделия, дается описание магнитно-импульсного оборудования и процесса упрочнения дереворежущего концевого инструмента (фрезы). Обработанные магнитным полем концевые фрезы диаметром 10 мм (сталь Р6М5) значительно улучшили прочностные показатели, при этом после упрочняющей обработки не требуются дополнительные операции термообработки и шлифования, что делает этот процесс особенно привлекательным для производителей.

The woodworking end tool concerns one of kinds of the tool most widely applied in production. Specificity of work: high speeds of rotation, axial loadings, the big twisting moments lead to its low firmness at the expense of breakages. Widely applied methods of hardening of the tool at the expense of coating of the appropriate coatings raise its wear resistance, but do not influence volume durability. Now at manufacturing of woodworking end tool even more often apply hard or diamond cutting elements, especially to processing of wood particle boards or an acetylated wood. Nevertheless, the trailer tool made of tool steels, is widely enough applied in production an questions of increasing of its wear resistance and volume durability are rather actual. The paper unravels the essence of the mechanism of hardening action of electromagnetic field on items and describes magnetic – pulse equipment and process of hardening of wood-cutting end tool (mill).

Введение. Дереворежущий концевой инструмент (сверла, фрезы и т. д.) относится к одному из наиболее широко применяемых в производстве видов инструмента. Специфика работы: высокие скорости вращения, осевые нагрузки, большие крутящие моменты приводят к его низкой стойкости за счет поломок. Широко применяемые методы упрочнения инструмента за счет нанесения соответствующих покрытий повышают его износостойкость, но не влияют на объемную прочность.

В настоящее время при изготовлении дереворежущего концевого инструмента все чаще применяются твердосплавные или алмазные режущие элементы, особенно для обработки древесностружечных плит или модифицированной древесины. Тем не менее концевой инструмент, изготовленный из инструментальных сталей, достаточно широко используется в производстве, и поэтому вопросы повышения его износостойкости и объемной прочности весьма актуальны.

Учеными Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси разработана новая технология улучшения прочностных свойств стальных изделий, в том числе закаленных, путем воздействия сильным импульсным электромагнитным полем. При таком воздействии устраняются дефекты в кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла.

Преимуществом магнитно-импульсной обработки по сравнению с известными методами упрочнения является то, что геометрические параметры и качество поверхности обработанных изделий не меняются, не требуется дополнительная термообработка, сам процесс отличается низким энергопотреблением и высокой производительностью, экологической чистотой.

Основная часть. 1. *Теоретические предпосылки для упрочнения металлических изделий импульсным электромагнитным полем.* Развитие

современного производства требует создания металлических материалов, обладающих комплексом высоких эксплуатационных свойств. Такая задача может быть решена как совершенствованием существующих, так и созданием принципиально новых технологий обработки металлов и сплавов. В настоящее время возможности традиционных способов обработки металлических материалов во многом ограничены. Основой для создания новых технологий являются результаты последних исследований по взаимодействию электромагнитного поля, ультразвука, излучения лазера и т. д. с металлами и сплавами.

Взаимодействие электромагнитного поля с металлами наиболее полно изучено применительно к технологиям обработки давлением (например, магнитно-импульсная штамповка). Вместе с тем высокая технологичность и экологичность магнитных методов воздействия делает их перспективными в плане создания на их базе разнообразных технологий обработки металлов и сплавов. Влияние магнитных полей на изменение структуры и свойств металлов и сплавов изучено мало. Некоторые аспекты фазовых и структурных превращений в переменных магнитных полях железо-углеродистых сплавов рассматриваются в научных публикациях [1–5]. Основными факторами, определяющими воздействие магнитно-импульсной обработки (МИО) на металлические материалы, являются [6]:

- непосредственное магнитное воздействие (намагничивание, перемагничивание, магнитострикция);
- ток проводимости, индуцированный переменный во времени составляющей магнитного поля;
- силовое воздействие магнитного поля на индуцированный электрический ток;
- джоулево тепловыделение;
- электронно-пластический эффект, обусловленный движением электронов и их взаимодействием с дислокациями, вызывающий снижение сопротивления деформированию и повышение пластичности металлов;
- упругие и пластические деформации.

Для общего случая падения плоской волны на плоскую поверхность металла значения напряженностей электрического и магнитного полей соответственно имеют вид [7]:

$$E_x = E_0 \exp \left[-\frac{2\pi x}{c \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} \right] \cos \left(2\pi f t - \frac{2\pi x}{c \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} \right); \quad (1)$$

$$H_x = H_0 \exp \left[-\frac{2\pi x}{c \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} \right] \cos \left(2\pi f t - \frac{2\pi x}{c \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} - \frac{\pi}{4} \right), \quad (2)$$

где c – скорость света; μ – магнитная проницаемость; ρ – удельное электросопротивление; f – частота колебаний

При проникновении плоской электромагнитной волны в металл (рис. 1) уменьшается амплитуда напряженности электрического и магнитного полей; меняются фазы колебаний; фаза магнитного поля отстает от фазы электрического поля на $\pi/4$. С переходом к глубинным слоям металла количество поглощенной энергии убывает:

$$\frac{4\pi}{-\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} = \frac{2}{d}, \quad (3)$$

где d – глубина проникновения магнитного поля в металл.

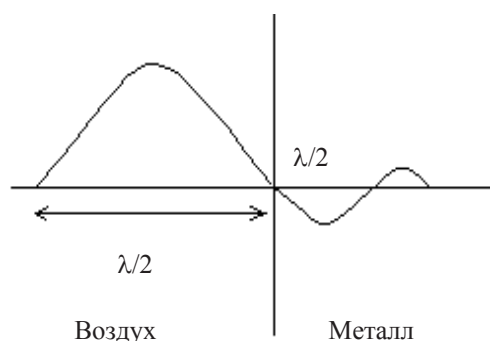


Рис. 1. Схема проникновения электромагнитной плоской волны в металл

В слое $x = d$ поглощается 86,5% всей энергии, переданной в металл. Величина d зависит от констант материала и частоты электромагнитных колебаний f , что показано в таблице. Оценка воздействия импульса магнитного поля на тонкую проводящую пластину перпендикулярно ее поверхности дана в отчете о НИР [6].

Зависимость глубины проникновения излучения в медь от частоты магнитного поля

Частота, Гц	Глубина проникновения в медь d , мм
10^8	0,007
10^6	0,67
10^5	0,21
10^4	0,67
$2 \cdot 10^3$	1,5
$0,5 \cdot 10^2$	9,5

Для медного образца при времени импульса 10^{-4} с и индукции 1 Тл приращение температуры составляет порядка 20 К, давления ~ 15 МПа; плотность тока $- 6 \cdot 10^3$ А/мм². Силовое воздействие в данном случае достаточно эффективно для того, чтобы вызвать структурные изменения [8], но не достигает пределов упругости и прочности. Плотность тока достаточна для достижения электронно-пластического эффекта [9].

Расчет диффузии магнитного поля для однородного проводящего цилиндра, находящегося в поле цилиндрического индуктора, дан в работе [6]. Схема взаимного расположения образца и поля представлена на рис. 2. Для этого случая уравнения Максвелла в цилиндрических координатах (r, φ, z) имеют вид:

$$\frac{\partial H}{\partial r} = -\sigma E; \quad \frac{\partial(rE)}{r\partial r} = -\mu \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (4)$$

где H – напряженность магнитного поля; μ – магнитная проницаемость; r – радиус цилиндра; E – напряженность электрического поля; σ – проводимость материала пластины

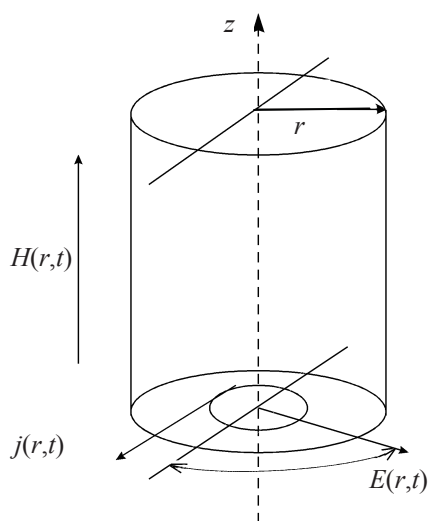


Рис. 2. Схема взаимного расположения образца и поля

При индукции поля ~ 1 Тл давление на обрабатываемый материал составляет $\sim 0,4$ МПа, при возрастании индукции до 10 Тл давление возрастает до 40 МПа (при длительности импульса $\sim 10^{-3} \div 10^{-5}$ с).

Распределения давлений в детали при механической и электромагнитной обработках существенно отличаются друг от друга [10]. Для ферромагнитных материалов положительному приращению давления соответствует отрицательное приращение объемной плотности энергии магнитного поля.

$$dp = -dW'. \quad (5)$$

При этом

$$W' = \frac{B^2}{2\mu}, \quad (6)$$

где B – индукция; μ – магнитная проницаемость.

Давление в точке с координатой x определяется по формуле

$$p_x = \int_0^x dp = \int_0^x (-dW') = W'_0 - W'_x, \quad (7)$$

где W'_0 – объемная плотность энергии магнитного поля на поверхности детали; W'_x – объемная плотность энергии магнитного поля в точке с координатой x .

Давление внутри детали в точке с координатой x :

$$p_x = \frac{B_0^2}{2\mu} - \frac{B_x^2}{2\mu}. \quad (8)$$

Для среднего значения давления было получено выражение:

$$p_{x-\delta} = \frac{B_0^2}{2\mu} (1 - e^{-2\alpha x}), \quad (9)$$

где α – коэффициент затухания.

Для меди давление в детали толщиной 3 мм для частот 1, 5 и 50 кГц составляет до 62,5 кГ/см² (6,25 МПа). Распределение давлений тем сильнее отстает от линейного закона, чем больше коэффициент затухания. Если толщина детали превосходит половину длины электромагнитной волны в материале, то давление в ней нарастает только на участке, где $x < \lambda/2$, и остается постоянным при $x > \lambda/2$ (рис. 3).

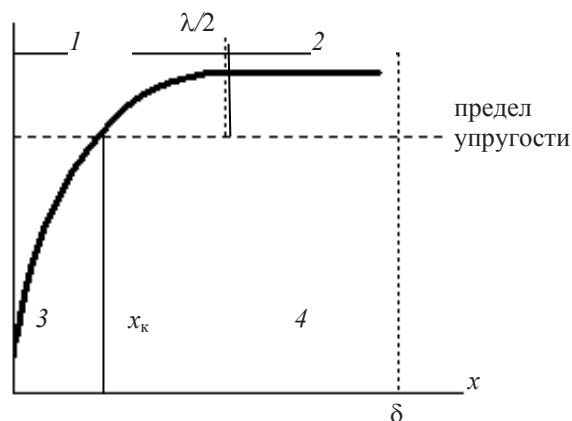


Рис. 3. Распределение давлений в детали при магнитно-импульсной обработке:
1 – область нарастающего давления;
2 – область постоянного давления;
3 – область растяжения; 4 – область сжатия

Из рис. 3 видно, что остаточная деформация нарастает, если превзойден предел упругости. Напряжения в области 3 малы, $\sigma > \sigma_{упр}$ только там, где $x > x_k$. Величина x_k уменьшается с ростом α , следовательно, сокращается область растяжения и увеличивается область сжатия. Экспериментально упрочнение в меди изучено в [11].

2. Упрочнение металлического изделия в результате воздействия электромагнитного поля. Под действием импульсного магнитного поля возникает ударная волна, которая, распространяясь вглубь образца, вызывает упрочнение внутренних слоев. Если отсутствует видимая деформация, то можно считать, что упрочнение внутренних слоев обусловлено в первую очередь распространением ударной волны. Для меди М1 зависимость микротвердости от глубины исследуемого слоя представлена на рис. 4.

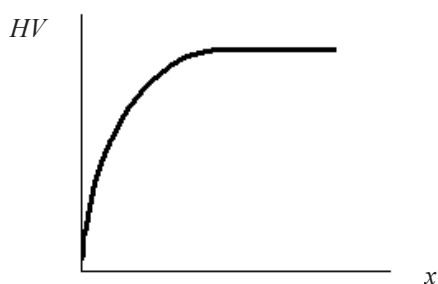


Рис. 4. Зависимость микротвердости от глубины слоя и энергии емкостного накопителя

Упрочнение при увеличении расстояния от поверхности возрастает, что согласуется с данными [10]. Дополнительное упрочнение не зависит от величины исходного зерна и может быть связано либо с измельчением зерна, либо с изменением дислокационной структуры. Зависимость микротвердости от энергии емкостного накопителя представлена на рис. 5.



Рис. 5. Зависимость микротвердости от энергии емкостного накопителя

Разупрочнение материала может быть связано с поверхностным разогревом образцов под действием индуцированного тока. С ростом

величины разрядного тока уменьшается величина скин-слоя, а следовательно, увеличивается плотность тока и повышается температура на поверхности обрабатываемого материала.

3. Устройство магнитно-импульсного оборудования. Магнитно-импульсное оборудование для упрочнения металлических изделий (например, сферической или продолговатой цилиндрической формы) состоит из емкостного накопителя, зарядного устройства, устройства поджига, устройства управления зарядом, устройства управления, специального инструмента (индуктора) для обработки изделий импульсным магнитным полем и устройства для автоматической подачи изделий в зону обработки (индуктор). В этом оборудовании используется высокое напряжение, поэтому все его основные элементы заключены в металлический шкаф, а управление процессом магнитно-импульсной обработки производится с помощью пульта управления.

На рис. 6 показана фотография общего вида магнитно-импульсного оборудования, состоящего из магнитно-импульсной установки – 1 (МИУ), панели управления – 2, индуктора и автоматизированного устройства подачи шариков 3 (индуктор скрыт за металлическим кожухом). На рис. 7 показано автоматизированное устройство для подачи изделий сферической или цилиндрической продолговатой формы в индуктор (кожух снят).

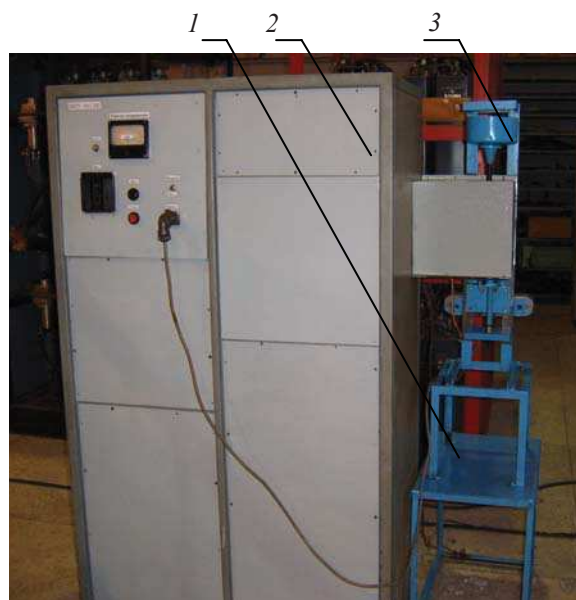


Рис. 6. Общий вид магнитно-импульсного оборудования

Специальный инструмент для автоматической обработки изделий, в данном случае дереворежущего концевой инструмента, состоит из индуктора (находится внутри защитного металлического кожуха), установленного на заземленном основании, соединенного с выходными

клеммами установки МИУ; устройства загрузки изделий в индуктор и устройства выгрузки обработанных изделий из него.

Установка для магнитно-импульсной обработки металлов представляет собой генератор импульсного тока (ГИТ), состоящий из емкостного накопителя электрической энергии – высоковольтной конденсаторной батареи, рабочего органа – индуктора и коммутирующего устройства – высоковольтного управляемого разрядника. С помощью разрядника производится разряд конденсаторной батареи на индуктор.

В рабочей зоне индуктора импульсное магнитное поле наводит в находящейся в нем металлической заготовке вихревые токи.



Рис. 7. Устройство для подачи шариков в индуктор

В результате взаимодействия токов индуктора и заготовки возникают мощные механические усилия, оказывающие давление как на заготовку, так и на индуктор. Под действием давления происходит упругое обжатие упрочняющегося изделия, изменяющее их структуру и прочностные свойства.

Емкостный накопитель заряжается до необходимой для данной технологической операции энергии с помощью зарядного устройства.

Рабочие разряды накопителя производятся при помощи устройства поджига, включающего разрядник.

4. Процесс упрочнения дереворежущего концевой инструмента. Технологическая последовательность операций при упрочняющей обра-

ботке шариков магнитно-импульсным воздействием состоит в следующем.

Внешним осмотром проверяется отсутствие повреждений установки, исправность заземления, подводящих коммуникаций, отсутствие механических повреждений корпуса и загрязнений, наличие и присоединение к заземлению разрядной штанги, исправность защитного кожуха, исправность блокировок.

Загрузка изделий производится в устройство загрузочное над индуктором при выключенной установке. Режимы работы устанавливаются, если необходимо, в положение, соответствующее, например, уровню энергии 2 кДж, при этом рабочее напряжение составляет 6,4 кВ, время зарядки 5–60 с, время обработки 0,2 с, выгрузка изделия из индуктора до 1 с.

Автоматически по установленным режимам происходит поджиг, разряд и обработка загруженной порции изделий. После обработки срабатывает устройство выгрузки обработанного изделия. Затем весь цикл повторяется.

На магнитно-импульсной установке была подвергнута упрочнению партия дереворежущих концевых фрез из стали Р6М5 диаметром 10 мм в количестве 10 шт.

Испытания прочности обработанных импульсным электромагнитным полем инструментов показал, что их прочностные свойства повышаются на 25–30% по сравнению с необработанным инструментом (испытания производились по методу кручения до разрушения образцов).

Заключение. Проведенные исследования показали высокую эффективность упрочняющего воздействия сильного импульсного магнитного поля на стальные изделия, в частности дереворежущий концевой инструмент. Обработанные магнитным полем концевые фрезы диаметром 10 мм (сталь Р6М5) значительно улучшили прочностные показатели, при этом после упрочняющей обработки не требуются дополнительные операции термообработки и шлифования, что делает этот процесс особенно привлекательным для производителей.

Литература

1. Постников, С. Н. Некоторые физические аспекты магнитной обработки инструмента. Вопросы электрофизики трения и обработки резанием / С. Н. Постников, А. Ф. Годлина, В. Н. Тараканов // Труды Горьк. политехн. ин-та им. А. А. Жданова. – 1974. – Вып. 4. – С. 27–35.
2. Фокина, Е. Влияние импульсного магнитного поля на положение температурного интервала мартенситного превращения в стали / Е. Фокина, Л. В. Смирнов, В. Д. Садовский // Физика металлов и металловедение. – 1965. – Т. 19, вып. 4. – С. 592–595.

3. Электронно-микроскопическое исследование структуры кристаллов мартенсита, зародившихся под действием импульсного магнитного поля / В. М. Счастливец и [др] // Физика металлов и металловедение, 1981. – Т. 51, вып. 4. – С. 773–782.

4. Перестройка дефектных комплексов в кристаллических твердых телах под действием магнитных полей допороговых энергий / С. Н. Постников и [др] // Прикладные проблемы прочности и пластичности. – 1980. – № 1. – С. 138–143.

5. Постников, С. Н. Влияние импульсных магнитных полей на усталость быстрорежущей стали / С. Н. Постников, А. Д. Кунин, А. А. Черников // Электронная обработка материалов. – 1981. – № 6. – С. 8–11.

6. Исследование эффектов обработки сильными импульсными магнитными и электрическими полями на пластические и физико-механические свойства материалов для машино- и приборостроения: отчет о НИР/ Фонд фундаментальных исследований Респ. Беларусь; Физ.-

техн. ин-т НАН Беларуси. Проект № Т7-367. № Гос. регистрации 19942666. – Минск, 1984.

7. Кидин, И. Н. Термическая обработка стали при индукционном нагреве / И. Н. Кидин. – М., 1950. – 316 с.

8. Прочность сплавов криогенной техники при электромагнитных воздействиях / В. А. Стрижало [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1990.

9. Спицын, В. И. Электропластическая деформация металлов / В. И. Спицын, О. А. Троцкий. – М.: Наука, 1985.

10. Брон, О. Б. Распределение давлений в детали при магнитно-импульсной обработке / О. Б. Брон, В. П. Епечурин // Кузнечно-штамповочное производство, 1968. – № 5. – С. 26–29.

11. Баткилин, Я. М. Особенности упрочнения меди при магнитно-импульсной обработке / Я. М. Баткилин, А. В. Легеза // Вестник Харьковского политехнического института, 1974. – № 94. – Вып. 2. – С. 53.

Поступила 01.04.2010