

## О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЛУБИНЫ И КОЛИЧЕСТВА ПАЗОВ В БОЙКЕ СОЛЕНОИДНОГО МОЛОТКА

Н. П. РЯШЕНЦЕВ, А. В. ФРОЛОВ

(Представлено кафедрой горных машин и рудничного транспорта)

В настоящее время устойчивый максимальный коэффициент полезного действия (к. п. д.) соленоидных молотков со свободным выбегом бойка типа МС-15 составляет (35—40%). Столь высокий к. п. д. по сравнению с другими конструкциями машин ударного действия [1, 2] является результатом тщательной конструктивной отработки всех узлов молотка и схемы его питания. Применение магнитопровода специальной формы [3, 4] позволило резко уменьшить потери в стали молотка, а работы, проведенные по определению рациональной формы катушки [4], выявили возможность снижения потерь в меди катушки с одновременным уменьшением ее веса на единицу мощности молотка.

Исследования, проведенные на кафедре горных машин и рудничного транспорта Томского политехнического института, позволили наметить следующие основные пути дальнейшего повышения к. п. д. соленоидных молотков со свободным выбегом бойка.

1. Выбор рациональных параметров, устраняющих электромагнитное торможение бойка в момент выхода его из положения магнитного равновесия.

2. Выбор жесткости и частоты собственных колебаний амортизационной пружины, соответствующих режиму работы молотка.

3. Уменьшение потерь на трение бойка о стенки направляющей трубы.

4. Снижение радиальных сил, действующих на боек в результате эксцентричного расположения в направляющей трубе.

5. Снижение потерь в стали магнитопровода и бойка.

6. Уменьшение омических потерь в катушке соленоидного молотка.

Анализ энергетической диаграммы соленоидных молотков со свободным выбегом бойка показывает, что основными потерями являются потери в стали молотка и омические потери катушки, составляющие в сумме до 60% от всей потребляемой мощности с преобладающим влиянием потерь в стали. Потери в стали состоят из потерь на перемагничивание (гистерезис) и потерь на вихревые токи. Так как магнитопровод соленоидного молотка (ярмо и полюса) изготавливается из трансформаторной стали, то величина потерь на гистерезис в нем будет незначительной. Очевидно, потери на гистерезис в молотке будут определяться в основном гистерезисными потерями в стали бойка, который выпол-

няется из качественной конструктивной стали с последующей закалкой до определенной твердости, что вызывает дальнейшее увеличение потерь на гистерезис за счет увеличения остаточной индукции и коэрцитивной силы. Если бы боек находился в переменном магнитном поле, то потери на гистерезис в нем составляли бы значительный процент по сравнению с другими потерями энергии. В действительности питание соленоидных молотков со свободным выбегом бойка производится по одноконтурной выпрямительной схеме, и по катушке молотка протекает однозначный пульсирующий ток. В этом случае и напряженность магнитного поля будет однозначной и пульсирующей, так как напряженность прямо пропорциональна первой степени намагничивающего тока в обмотке, и перемагничивания материала наблюдаться не будет.

Таким образом, потери в стали соленоидного молотка составляют потери на вихревые токи. Потери на вихревые токи в молотке складываются из потерь в магнитопроводе и в бойке.

Для магнитопровода молотка, выполненного из листов слаболегированной листовой стали Э12, изолированных друг от друга, удельные потери при индукции  $14 \cdot 10^3$  гс составляют около 6 вт/кг.

При весе магнитопровода 0,8 кг общие потери в стали (в том числе и на перемагничивание) будут равны 4,8 вт или около 2% от всей потребляемой молотком мощности.

Таким образом, мы пришли к выводу, что основными потерями в соленоидных молотках со свободным выбегом бойка являются омические потери в меди катушки, пропорциональные квадрату полного тока, и потери на вихревые токи в бойке молотка. Величину омических потерь, не изменяя рабочих параметров, можно уменьшить только за счет величины тока, протекающего в катушке, что, в свою очередь, можно достигнуть только уменьшением активной составляющей тока. Уменьшать величину намагничивающей составляющей тока нецелесообразно, так как одновременно с этим будет снижаться и намагничивающая сила катушки, определяющая полезную работу, совершаемую соленоидным молотком.

Известно, что величина активной составляющей тока катушки с сердечником прямо пропорциональна эквивалентному омическому сопротивлению этого сердечника [5] или, другими словами, величине потерь на вихревые токи. Поэтому потери на вихревые токи в бойке являются тем звеном в конструкции молотка, за счет которого можно значительно повысить к. п. д., а тем самым уменьшить нагрев соленоидного молотка, являющийся одним из его серьезных недостатков.

Основными средствами уменьшения потерь на вихревые токи в бойке являются:

1. Разработка схем питания соленоидных молотков, позволяющих получать плоскую вершину кривой магнитной индукции.

2. Применение ферромагнитных материалов с малой удельной электрической проводимостью.

3. Выбор режима и способа механической и термической обработки бойка.

4. Выбор формы и конструкции бойка, обладающего наибольшим эквивалентным активным сопротивлением.

Все эти способы более или менее полно освещены в литературе [6, 7, 8].

Настоящая работа ставит своей целью частично осветить вопрос влияния пазов в бойке соленоидного молотка на потери в стали.

Боек соленоидного молотка со свободным выбегом выполняется из конструкционной стали 5ХВ2С в виде цилиндра. С целью уменьшения потерь на вихревые токи по образующей бойка прорезаются пазы

(рис. 1, б), причем число пазов и их глубина выбираются без обоснованных соображений. Это приводит к повышению стоимости изготовления бойка за счет увеличения объема фрезерных работ, уменьшается сечение бойка, что приводит к увеличению магнитного сопротивления бойка без существенного уменьшения потерь на вихревые токи по сравнению с оптимальным числом и глубиной пазов.

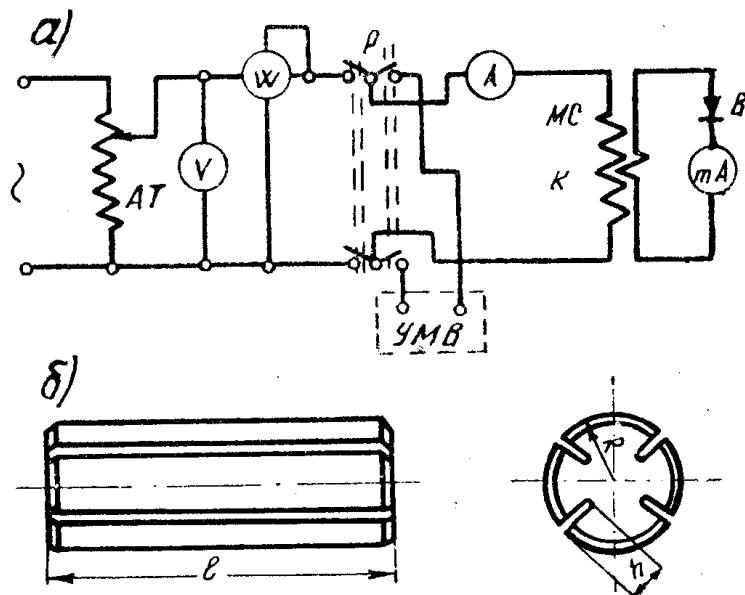


Рис. 1. Схема включения приборов—а и внешний вид бойка молотка—б.

С целью определения качественного и количественного влияния глубины и числа пазов на величину потерь от действия вихревых токов были проведены исследования по выбору рациональной формы бойка соленоидного молотка со свободным выбегом.

Основу методики исследований составляли следующие положения.

Все исследования проводились в режиме, когда боек молотка находился в положении магнитного равновесия и магнитная энергия катушки не превращалась в механическую, что дало возможность просто и достаточно точно определять потери в стали магнитной системы молотка. При исследовании ярмо и полюса снимались для уменьшения погрешности при определении потерь в стали бойка. **Измерения** производились по схеме, представленной на рис. 1, а.

Потери в стали бойка определялись методом амперметра и ваттметра, сущность которого заключается в том, что мощность  $P$ , показываемая ваттметром, включенным в электрическую цепь, содержащую катушку с железным сердечником, складывается из мощности потерь в стали сердечника  $P_{ст}$  и мощности, расходуемой в обмотке катушки  $P_m$  с учетом потерь в самих измерительных приборах.

Максимальное значение индукции в бойке определялось с помощью измерительного витка  $K$ , помещенного на направляющей трубе соленоидного молотка и измеряющего индукцию в строго определенном сечении бойка. Измерение э. д. с., наводимой в витке, производилось прибором магнитоэлектрической системы, включенным последовательно с германиевым диодом. Форма и величина э. д. с. самоиндукции контролировалась с помощью электронного осциллографа ЭО-6 м.

Известно, что прибор магнитоэлектрической системы показывает среднее значение измеряемого тока. При однополупериодном выпрямлении

$$e_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} e dt = \frac{W}{T} \int_{t_1}^{t_2} d\Phi = Wf(\Phi_{t_1} - \Phi_{t_2}),$$

где  $f = \frac{1}{T}$  — частота изменения потока.

В случае германиевого выпрямителя пределы интегрирования должны быть взяты от 0 до  $\frac{T}{2}$ , что соответствует прохождению э. д. с.  $e$  через 0. В эти моменты времени  $\frac{d\Phi}{dt} = 0$ , но сама функция имеет максимальное значение. При отсутствии четных гармоник

$$\Phi_0 = -\Phi_{T/2} = \Phi_{\text{max}}.$$

Тогда

$$\varepsilon_{\text{ср}} = 2Wf\Phi_{\text{max}}.$$

Таким образом, измеряя среднее значение э. д. с., в измерительном витке, можно определить максимальное значение магнитного потока, проходящего по сечению бойка,

$$\Phi_{\text{max}} = \frac{\varepsilon_{\text{ср}}}{2Wf},$$

не определяя дополнительно коэффициента формы кривой э. д. с. самоиндукции в измерительном витке и проводить исследования потерь в стали бойка как на синусоидальном, так и на пульсирующем токах в катушке молотка.

В случае исследования на пульсирующем токе выпрямитель в цепи измерительного витка необходимо включать таким образом, чтобы замерять среднее значение э. д. с. самоиндукции, соответствующей возрастанию тока в катушке молотка.

Потери в стали бойка определялись как разность показаний ваттметра и омических потерь в измеряемой цепи

$$P_{\text{ст}} = P - I^2R.$$

Полная активная мощность, потребляемая катушкой молотка, и величина тока, протекающего в ней, измерялись приборами электродинамической системы с классом точности 0,5 и 0,2 соответственно. Относительные погрешности приборов на всем диапазоне измерений не превышали по току 1,5%, по мощности 2,2%, по сопротивлению 1,5% и по э. д. с. 4%.

Относительная погрешность в определении потерь в стали бойка подсчитывалась по выражению

$$\gamma_{\text{ст}} = \frac{\Delta P + \Delta P_{\text{м}}}{P - P_{\text{м}}} \cdot 100 \%,$$

где

$\Delta P$  — абсолютная погрешность определения мощности, регистрируемой ваттметром;

$\Delta P_{\text{м}}$  — абсолютная погрешность определения потерь в меди

$$\Delta P_{\text{м}} = \left( \frac{2\Delta I}{I} + \frac{\Delta R}{R} \right) P,$$

где  $\Delta I$  и  $\Delta R$  соответственно абсолютные погрешности по току и сопротивлению. Относительная погрешность при измерении потерь в стали не превышала 2,62%.

На рис. 2 представлены результаты исследований потерь в стали бойка соленоидного молотка в зависимости от магнитной индукции при различном числе пазов и их постоянной глубины.

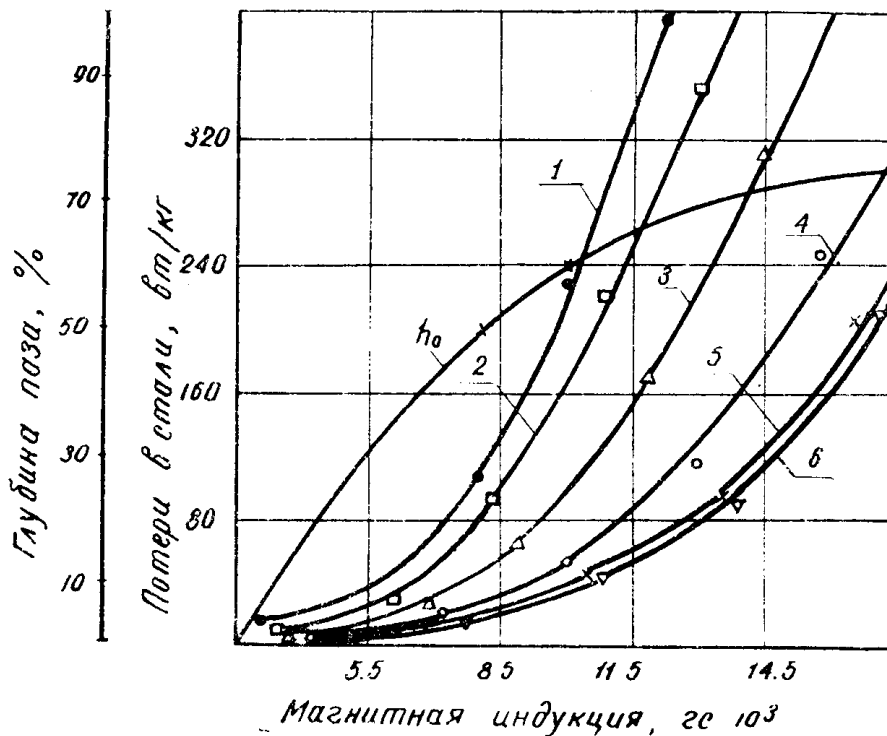


Рис. 2. Зависимости потерь в стали от магнитной индукции.

Вследствие неоднородности бойков по весовым характеристикам за счет пазов потери в стали приведены на единицу веса бойка.

На рис. 2 соответственно обозначены: 1 — боек сплошной, без пазов, 2 — один паз, 3 — два паза, 4 — четыре паза, 5 — шесть пазов, 6 — пять пазов той же глубины, что и для случая кривых 2—5 и один до центра.

Потери в стали бойка представляют типичную квадратичную зависимость от индукции, т. е. параболическую кривую, симметричную относительно ординатной оси. Из рис. 2 видно, что величина потерь в стали бойка при одном и том же значении индукции тем меньше, чем больше число пазов в бойке, причем это уменьшение не подчиняется закону обратной пропорциональности, а имеет более сложную зависимость. До каких-то пределов увеличение числа пазов приводит к резкому уменьшению потерь, при дальнейшем увеличении числа пазов потери в стали уменьшаются незначительно. Увеличение глубины одного из пазов не приводит к какому-либо заметному уменьшению потерь в стали бойка (кривые 5 и 6). Это объясняется, очевидно, влиянием поверхностного эффекта.

Таким образом, увеличение числа пазов в бойке приводит к уменьшению потерь в стали, что, в свою очередь, уменьшает активную составляющую тока, проходящего через катушку молотка. В результате этого уменьшаются и омические потери в катушке, определяемые как реактивной, так и активной составляющей тока, что показано на рис. 3, представляющий зависимость потерь в меди катушки от индукции при

тех же обозначениях, что и на рис. 2. Из рис. 3 видно, что увеличение числа пазов ведет к уменьшению потерь в меди молотка, несмотря на то, что эквивалентная индуктивность молотка уменьшается с увеличением числа пазов в силу уменьшения магнитной проводимости воздушного зазора. Очевидно, уменьшение активной составляющей тока происходит на более значительную величину, чем приращение реактивной составляющей.

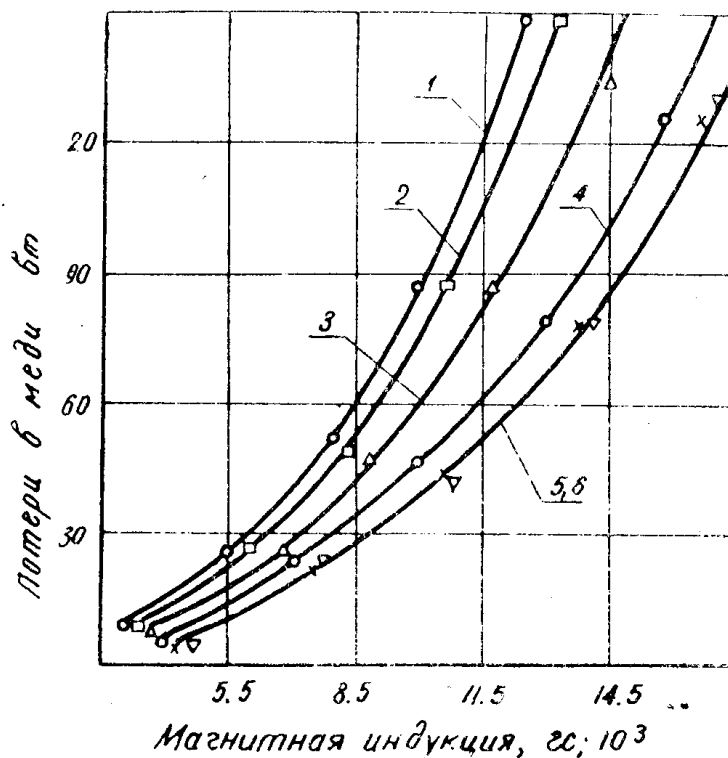


Рис. 3. Зависимости потерь в меди от магнитной индукции.

С целью более точного выяснения картины влияния числа пазов на потерю в стали бойка на рис. 4 представлены зависимости потерь в стали от числа пазов в бойке при различных значениях магнитной индукции. Из рис. 4 видно, что число пазов оказывает существенное влияние на потери в стали бойка, в количественном отношении не зависящее от величины магнитной индукции.

Действительно, при индукции 5,5 кГс увеличение пазов с одного до двух вызывает уменьшение потерь в 1,48 раза, при индукции 8 кГс — в 1,4 раза, а при индукции 13 кГс — в 1,48 кГ. Увеличение числа пазов с 4 до 5 дает уменьшение потерь при тех же значениях индукции в 1,24; 1,28 и 1,24 раза. Таким образом, характер влияния числа пазов на потери в стали бойка является одним и тем же при различных значениях магнитной индукции (в пределах погрешности измерений).

Это дает возможность построить процентную характеристику, отображающую наиболее полно зависимость между потерями в стали и числом продольных пазов в бойке соленоидного молотка. При построении этой характеристики по одной оси будем откладывать число пазов, а по другой — удельные потери в стали бойка, выраженные в процентах, т. е.

$$\delta = \frac{P_0 - P_n}{P_0} 100 \%,$$

где  $P_0$  — потери в стали сплошного бойка (без пазов);

$P_n$  — потери в стали бойка с продольными пазами.

Результаты расчета представлены на рис. 4 в виде кривой  $\delta$ , выходящей из начала координат, из которой видно, что наибольшее уменьшение потерь достигается в случае двух пазов. При дальнейшем увеличении числа пазов от 2 до 5 потери уменьшаются более плавно. При числе пазов больше 5 потери в стали уменьшаются на незначительно малую величину, практически оставаясь теми же самыми. Это можно объяснить тем, что при увеличении пазов в бойке одновременно будет уменьшаться сечение бойка. Значит при том же значении магнитного потока индукция в бойке будет возрастать, а в квадрате от нее будут увеличиваться потери на вихревые токи. Действительно, при увеличении числа пазов от 6 до  $\infty$  потери в стали уменьшаются только на 20% (рис. 4).

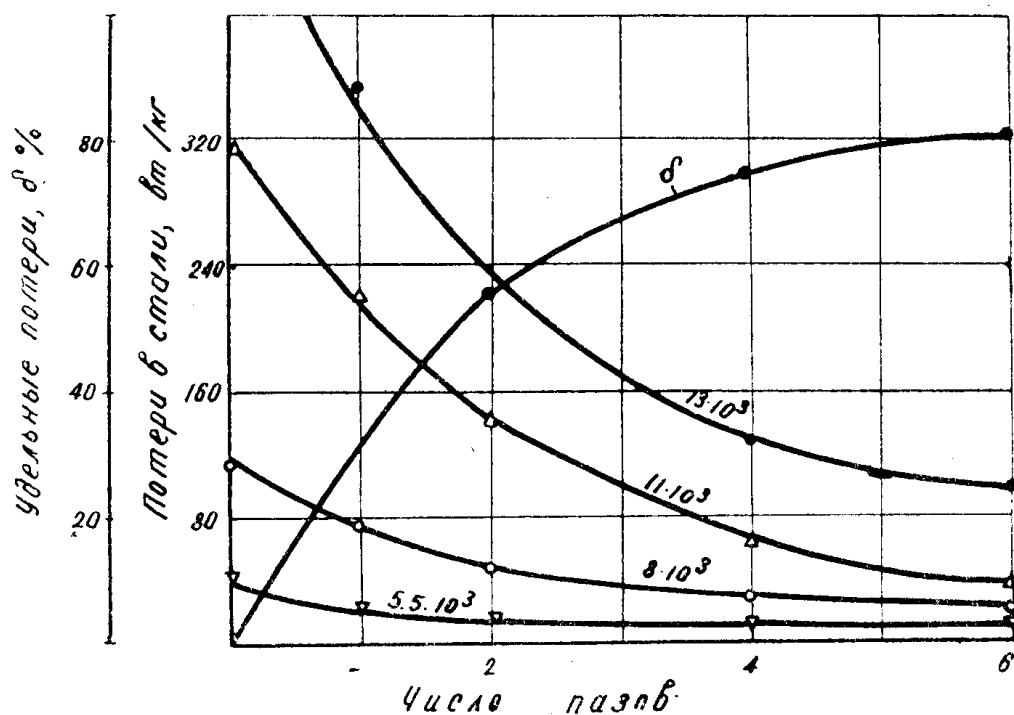


Рис. 4. Зависимости потерь в стали от числа пазов.

Таким образом, исследование зависимости потерь в стали бойка от количества пазов показывает, что целесообразно с точки зрения уменьшения потерь в стали бойка и объема фрезерных работ количество пазов выбирать в пределах (5—8) в зависимости от диаметра бойка (увеличивая их с увеличением диаметра бойка).

Для определения оптимальной глубины паза на рис. 5 представлена зависимость потерь в стали бойка от глубины паза для нескольких значений магнитной индукции. По оси абсцисс отложена относительная глубина паза в процентах, т. е.

$$h_0 = \frac{h}{R} \cdot 100 \% .$$

где

$h$  — глубина паза,  
 $R$  — радиус бойка.

Из рис. 5 видно, что с увеличением глубины паза потери в стали бойка уменьшаются до некоторых пределов, различных при разных значениях магнитной индукции. Например, при индукции в  $13 \text{ кгс}$  увеличение глубины паза с 70% до 100%, т. е. на 30% потери в стали уменьшаются на 3,5%, а при индукции  $8 \text{ кгс}$  всего на 0,5—0,8%.

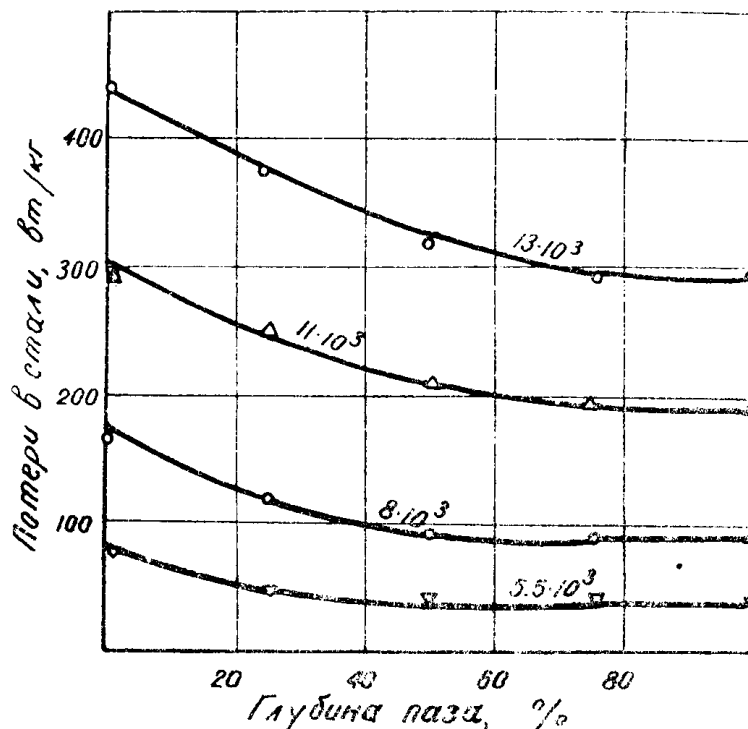


Рис. 5. Зависимости потерь в стали от глубины паза.

Построение процентной характеристики, как это делалось для случая, рассматриваемого на рис. 4, здесь невозможно, так как скорость изменения потерь в стали, как это показано, зависит не только от глубины паза, но и от величины магнитной индукции, что объясняется проявлением поверхностного эффекта [5, 9]. Глубина проникновения магнитного потока определяется

$$\Delta = k \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}},$$

где

$k$  — постоянная величина;

$\rho$  — удельное электрическое сопротивление материала бойка;

$\mu$  — магнитная проницаемость;

$f$  — частота сети.

Качественная конструкционная сталь марки 20-45 характеризуется тем, что с увеличением магнитной индукции от 0 до 4—6 кгс относительная магнитная проницаемость возрастает до максимальной величины. При дальнейшем возрастании индукции величина магнитной проницаемости падает и тем скорее, чем больше магнитная индукция [7, 10]. Например, при увеличении магнитной индукции с 5 до 14 кгс (для стали 20) величина магнитной проницаемости уменьшается в 2,2 раза, а значит, и глубина проникновения  $\Delta$  увеличивается в 1,48 раза, поэтому для уменьшения потерь на вихревые токи глубину паза необходимо увеличивать не менее чем в 1,48 раза. Очевидно, для любого



значения магнитной индукции в бойке соленоидного молотка существуют вполне определенные оптимальные значения глубины паза, т. е. такие значения глубины паза, при которых потери в стали и объем фрезерных работ будут минимальными. По результатам исследования, приведенным на рис. 5, показана зависимость глубины паза в бойке соленоидного молотка от величины магнитной индукции, которая представлена на рис. 2 в виде кривой  $h_0$ , по которой, зная величину индукции в бойке, можно выбрать оптимальное значение глубины паза.

Все значения глубины паза, лежащие выше кривой, приводят к увеличению объема фрезерных работ, уменьшению сечения бойка и его механической прочности без существенного уменьшения потерь в стали бойка.

### Выводы

Применяемая методика исследований позволяет с достаточной точностью выбрать число и глубину пазов в бойке соленоидного молотка с целью уменьшения потерь на вихревые токи.

Исследование зависимости потерь в стали бойка от количества пазов показало, что целесообразно с точки зрения уменьшения потерь и объема фрезерных работ количество пазов выбирать в пределах (5—8) в зависимости от диаметра бойка. Установлено, что для любого значения магнитной индукции существует вполне определенная глубина паза, соответствующая минимальному объему фрезерных работ и максимальному снижению потерь в стали бойка.

На рис. 2 построена зависимость для определения оптимальной глубины паза.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Москвитин А. И., Электрические машины возвратно-поступательного действия. АН СССР, 1950.
2. Алабужев П. М., Ряшенцев Н. П., Соленоидные молотки. Известия ТПИ, т. 108, 1959.
3. Ряшенцев Н. П., Алимов О. Д., Тимошенко Е. М., Фролов А. В., Авторское свидетельство, № 132578.
4. Ряшенцев Н. П., Фролов А. В., Тимошенко Е. М., Авторское свидетельство, № 139622.
5. Калаитаров В. И., Нейман Л. Р., Теоретические основы электротехники, ГЭИ, 1951.
6. Ряшенцев Н. П., Исследование рабочего процесса соленоидных молотков с безыскровым переключателем. Кандидатская диссертация, ТПИ, 1959.
7. Вонсовский С. В., Современное учение о магнетизме. ГТТИ, 1953.
8. Ряшенцев Н. П., Фролов А. В., К вопросу уменьшения потерь в стали соленоидных молотков. Известия ТПИ, т. 108, 1959.
9. Вайнберг А. М., Индукционные плавильные печи. ГЭИ, 1960.
10. Виттедберг В. И., Расчеты электромагнитных реле. ГЭИ, 1961.