

Н. П. РЯШЕНЦЕВ, А. П. ТРОНОВ, А. В. ФРОЛОВ, В. И. КОПЫТОВ

ВЫБОР МАТЕРИАЛА БОЙКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МОЛОТКОВ

(Представлено кафедрой горных машин и рудничного транспорта)

Анализ энергетической диаграммы соленоидных молотков со свободным выбегом бойка [2] показывает, что основными потерями являются потери в меди катушки и потери в стали магнитопровода, составляющие в сумме до 60% от всей потребляемой мощности.

Для магнитопровода молотка, изготовленного из листов слаболегированной стали Э12, изолированных друг от друга, удельные потери на гистерезис и вихревые токи при индукции 14000 гс составляют около 6 вт/кг, то есть около 2% всей потребляемой мощности. Следовательно, основными потерями в соленоидных молотках являются омические потери в меди катушки и потери на вихревые токи в бойке. Омические потери молотка можно ограничить путем уменьшения активной составляющей тока катушки, величина которой пропорциональна потерям от вихревых токов. Уменьшением потерь на вихревые токи в бойке можно повысить к. п. д. и уменьшить нагрев молотка. Основными средствами уменьшения потерь на вихревые токи в бойке являются:

1. Разработка схем питания молотков, позволяющих получать плоскую вершину кривой намагничивания индукции.
2. Применение ферромагнитных материалов с малой удельной электрической проводимостью и высокими магнитными свойствами.
3. Выбор формы и конструкции бойка, способа механической и термической обработки его, обеспечивающих минимальные электрические потери на единицу полезной работы.

В соленоидных молотках со свободным выбегом бойка изменять схему питания с целью уменьшения потерь на вихревые токи пока не представляется возможным. Поэтому необходимо изыскивать другие пути уменьшения потерь.

В существующих конструкциях соленоидных молотков типа МС-15 м, МС-20, МС-18/36 м полюса и ярмо выбираются из листовой электротехнической стали [3, 4], а боек изготавливается цельнометаллическим, так как он должен обладать достаточной механической прочностью при циклично-ударном режиме работы. Во время работы молотка боек торцовой частью ударяется о патрон, в который вставляется инструмент. В связи с этим при выборе материала бойка необходимо исходить из его сопротивляемости ударно-усталостному разрушению.

Износостойкость бойка не является критерием, определяющим выбор его материала. Это подтвердилось результатами проведенных лабораторных и промышленных испытаний молотков с направляющей трубой, изготовленной из нержавеющей стали 1X18H9T (внутренняя поверхность трубы хромировалась). При работе молотка без смазки в течение 100—150 час. износ составлял $0,01 \div 0,02$ мм, и детали были пригодны для дальнейшей работы.

Кроме того, боек должен иметь минимальные вихревые и гистерезисные потери при питании молотка пульсирующим током (по однополупериодной схеме выпрямления). В то же время боек должен быть изготовлен из материала с высокой проницаемостью в средних и сильных магнитных полях и в особенности с высоким насыщением. Значения начальной и максимальной проницаемости, а также остаточной индукции и коэрцитивной силы сердечника для материала бойка малосущественны, хотя желательно последние две величины иметь минимальными.

Электромагнитные свойства материалов, приведенные в работах [5—7], не могут быть целиком использованы для выбора материала бойка по следующим причинам: магнитный поток, протекающий через боек, несинусоидален, перемагничивание бойка не происходит, боек движется в изменяющемся магнитном поле и частично пересекает потоки рассеяния и утечки.

Нами проведены дополнительные исследования по разработке рекомендаций для выбора материала бойка, максимально удовлетворяющего прочностным и электромагнитным требованиям.

Учитывая, что молоток является быстродействующей машиной (продолжительность цикла 40 мсек), боек следует изготавливать из материала с минимальными вихревыми потерями, которые влияют не только на нагрев молотка, но и увеличивают время трогания бойка. При проектировании молотков целесообразно принимать индукцию бойка, близкой к индукции насыщения. При этом получается минимальный внутренний диаметр катушки, что приводит к уменьшению омических потерь.

Потери в бойке (вт/кгс), полученные на основании результатов экспериментальных исследований, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Материал Индукция гс	45	65Г	УВ	40ХН	18ХГТ	ХВГ	9ХС	P18	С4—28 48	Спец. чугун
14000	3,1	2,9	2,9	3,0	2,4	2,4	1,4	2,0	1,5	1,1
15000	3,3	3,1	3,1	3,1	2,5	2,5	1,4	2,0	1,5	1,3

Из таблицы видно, что наименьшие потери в бойке, изготовленном из специального чугуна. Однако только по потерям в стали нельзя рекомендовать материал бойка, так как в суммарные потери входят и потери в меди катушки, которые зависят от материала бойка. Кроме того, чугун не удовлетворяет требованиям циклично-ударного режима работы.

Из рассмотренных марок стали (табл. 1) видно, что сталь 9ХС наиболее полно удовлетворяет всем условиям работы бойка. Изготовленный из нее боек при соответствующей термообработке обеспечивает достаточную механическую прочность и минимальные электрические потери. Сравнивая химический состав и механические свойства сталей 9ХС и 40ХС, замечаем, что содержание углерода у последней марки

стали в 2 раза меньше, а кремния на 25—30% больше. Это дает основание утверждать, что потери в стали 40ХС будут меньше, чем у 9ХС. Значит к. п. д. молотка, работающего с бойком из стали 40ХС будет выше к. п. д. молотка с бойком из стали 9ХС (из-за отсутствия стали 40ХС сравнительные опыты не проводились).

Выше рассматривался цилиндрический боек без пазов и термообработки, которые оказывают большое значение не только на потери в стали бойка, но и на суммарные потери и рабочий процесс молотка, так как катушка молотка питается пульсирующим током, полученным по однофазной схеме выпрямления. Следовательно, боек и магнитопровод находятся в пульсирующем магнитном поле. При этих условиях в бойке возникают вихревые токи, создающие свой магнитный поток, который направлен противоположно основному потоку. Магнитный поток, созданный вихревыми токами, приводит к уменьшению результирующего потока внутри бойка (поверхностный эффект). В реальных условиях явление поверхностного эффекта приводит к изменению динамической индуктивности.

Теоретическое определение глубины проникновения магнитного потока для приведенных условий работы бойка затруднительно, поэтому данную задачу мы решали экспериментально. Для этого проводились опыты с цилиндрическим бойком, изготовленным из чугуна

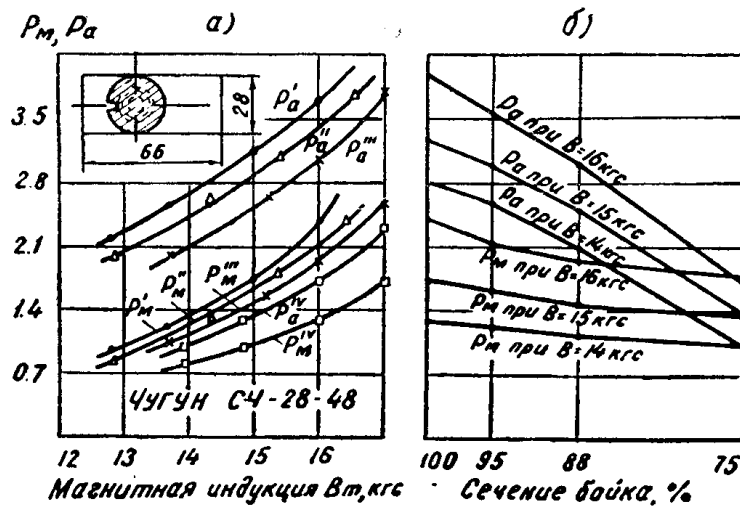


Рис. 1. Зависимости удельной потребляемой мощности p_a (вт/кгс) и потерь в меди p_m (ст/кгс) от индукции и сечения бойка. $p_a^I, p_a^{II}, p_a^{III}, p_a^{IV}$ соответственно показывают активные потери на единицу индукции для молотка с бойком без продольного отверстия и одним пазом, далее с этим же бойком, внутри которого просверлены сквозные отверстия диаметром 6; 9,5 и 14 мм. $p_m^I, p_m^{II}, p_m^{III}, p_m^{IV}$ — потери в меди на единицу индукции для молотка с бойком без отверстия и с одним пазом (p_m^I) и с бойком, внутри которого соответственно просверлены отверстия 6; 9,5 и 14 мм.

СЧ-28-48, с одним пазом глубиной 8 мм. Снимались зависимости потребляемой мощности p_a на единицу индукции и удельные омические потери p_m в зависимости от среднего значения максимальной индукции B_m поперечного сечения бойка. Результаты экспериментальных данных изображены на рис. 1.

Если принять площадь поперечного сечения бойка за 100%, то после просверливания продольного отверстия диаметром 6 мм, затем 9,5 и 14 мм, сечение бойка соответственно получим: 95, 88 и 75%.

Из приведенных зависимостей (рис. 1) видно, что с увеличением индукции удельные потери p_a и p_m возрастают, а с увеличением диаметра отверстия в бойке — уменьшаются. Это значит, что отношение наведенных вихревых токов к индукции в бойке уменьшается с увеличением высверливаемого отверстия, то есть улучшается степень использования бойка. В нашу задачу входило не только выявление степени использования бойка как активного материала, но и вскрытие возможностей увеличения к. п. д. молотка в целом.

Удельные активные потери $p_{a.ф}$ и удельные потери в меди $p_{m.ф}$ на единицу потока определялись по выражению

$$p_{a.ф} = \frac{P_{a.ф}}{\Phi}; \quad p_{m.ф} = \frac{P_{m.ф}}{\Phi},$$

где $P_{a.ф}$ — активная потребляемая мощность, *вт*; $P_{m.ф}$ — потери в меди, *вт*; Φ — магнитный поток, *кмкс*.

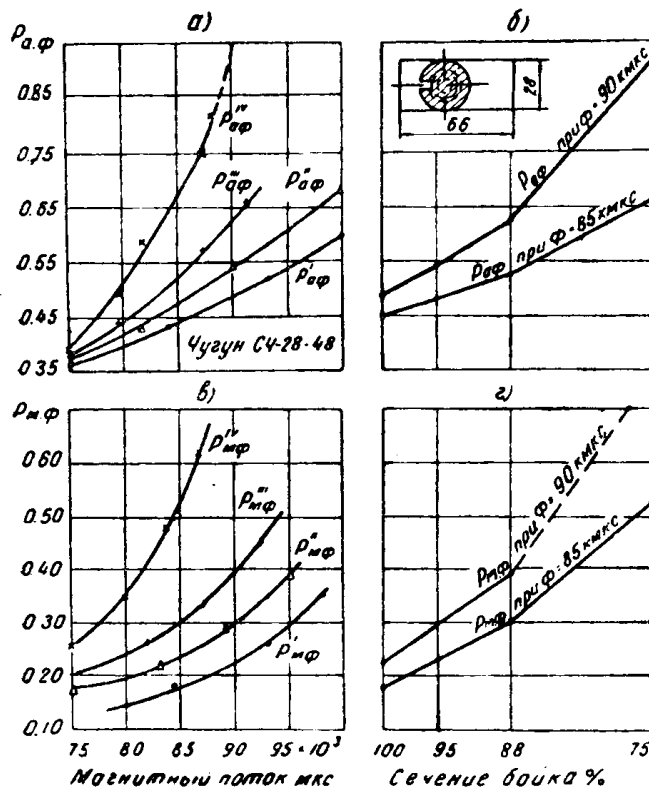


Рис. 2. Зависимости удельной потребляемой мощности p_a (*вт/кгс*) и потерь в меди p_m (*вт/кгс*) от магнитного потока и сечения бойка. $p_{a.ф}^I$, $p_{a.ф}^{II}$, $p_{a.ф}^{III}$, $p_{a.ф}^{IV}$ — соответственно показывают удельные активные потери для бойка без отверстия и для бойка с отверстием 6; 9,5 и 14 мм. $p_{m.ф}^I$, $p_{m.ф}^{II}$, $p_{m.ф}^{III}$, $p_{m.ф}^{IV}$ — удельные потери в меди для тех же условий.

Из полученных зависимостей (рис. 2) видно, что потери $p_{a.ф}$ и $p_{m.ф}$ возрастают быстрее, чем увеличивается магнитный поток. Наименьшие потери $p_{a.ф}$ и $p_{m.ф}$ у молотка с бойком без отверстия. С уве-

личением высверливаемого отверстия потери возрастают. Если сечение бойка при сверлении отверстия уменьшить на 12%, то при $\phi=90$ мм потери $p_{a,ф}$ увеличатся на 12,5%, а $p_{m,ф}$ — на 17,5%. С увеличением отверстия потери возрастают еще больше.

Уменьшение вихревых токов в бойке можно получить и другим способом — изготовлением продольных пазов. Чтобы выяснить влияние пазов на удельные активные потери p_a , удельные потери в меди p_m и удельные потери в стали $p_{c,б}$ бойка, были проведены эксперименты и построены зависимости указанных потерь от величины индукции (рис. 3, а) и от числа пазов (рис. 3, б—г). С увеличением индукции удельные потери p_a , p_m и $p_{c,б}$ возрастают. Изготовленный на бойке

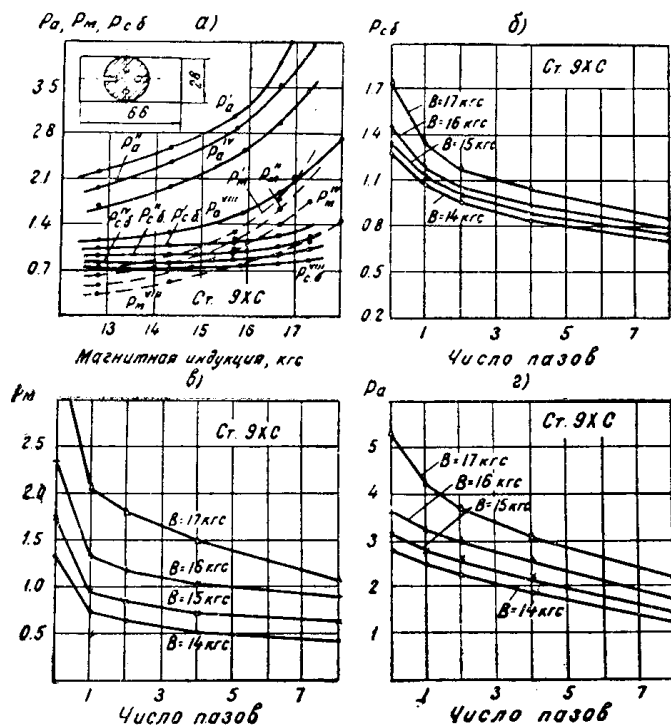


Рис. 3. Зависимости удельной потребляемой мощности p_a (вт/кГс), потерь в меди p_m (вт/кГс) и потерь в бойке $p_{c,б}$ (вт/кГс) от магнитной индукции и числа пазов. $p_a^I, p_a^{II}, p_a^{IV}, p_a^{VIII}$ соответственно показывают активные потери на единицу индукции для молотка с бойком, на котором изготовлены 1, 2, 4 или 8 пазов; $p_{c,б}^I, p_{c,б}^{II}, p_{c,б}^{IV}, p_{c,б}^{VI}$ соответственно показывают потери в стали бойка на единицу индукции, когда на бойке изготовлены 1, 2, 4 или 8 пазов; $p_m^I, p_m^{II}, p_m^{IV}, p_m^{VIII}$ соответственно показывают потери в меди молотка с бойком, на котором изготовлены 1, 2, 4 или 8 пазов.

один паз значительно уменьшает наведение вихревых токов и ограничивает влияние поверхностного эффекта. Это видно из того, что при изготовлении на бойке одного паза потери p_a (при индукции бойка $B_m = 14000-17000$ Гс) уменьшаются на 15—25%, при изготовлении двух пазов указанные потери дополнительно снижаются на 12—20%. При дальнейшем увеличении числа пазов потери уменьшаются. Однако с увеличением числа пазов зависимость $p_a = f(B_m)$ выполаживается (рис. 3, г), и при увеличении числа пазов с шести до восьми уменьшение потерь незначительное. Удельные потери в меди p_m и стали бойка

$p_{c.б}$ с увеличением числа пазов уменьшаются. Если увеличить ширину паза 28 мм бойка с 1 до 2 мм, то потери в стали бойка снижаются соответственно уменьшению его веса, потери в меди увеличиваются на 53—58% и активные потери возрастают на 10÷24%. Поэтому ширину паза на бойке нужно изготавливать минимальным.

Уменьшение потерь p_a при наличии пазов на бойке объясняется снижением активной составляющей тока, проходящего через катушку. В результате уменьшаются и омические потери p_m в катушке, определяемые как реактивной, так и активной составляющими тока. В этом случае уменьшение активной составляющей тока происходит более интенсивно, чем приращение реактивной составляющей. При изготовлении пазов более восьми потери p_a и p_m могут возрасти в результате уменьшения площади поперечного сечения бойка и увеличения паразитных зазоров между полюсом и бойком. При этом приращение реактивной составляющей происходит более интенсивно, чем уменьшение активной составляющей.

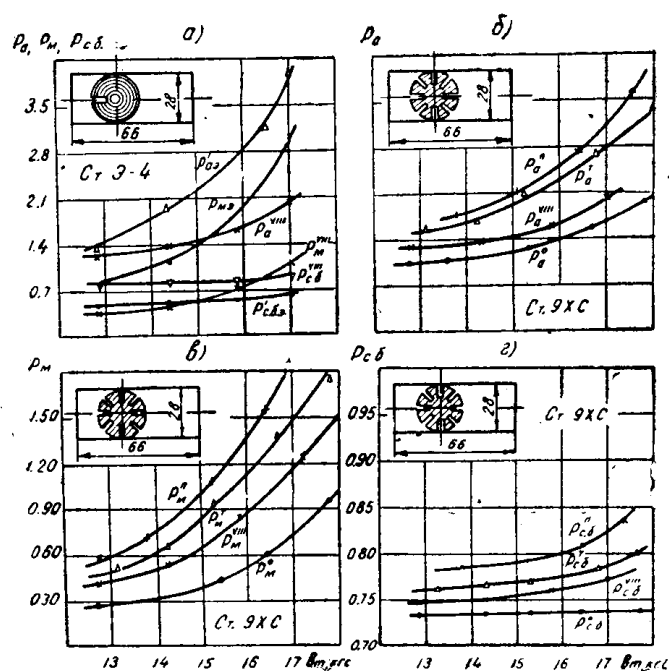


Рис. 4. Зависимости потребляемой мощности p_a (вт/кгс), потерь в меди p_m (вт/кгс) и потерь в бойке $p_{c.б}$ (вт/кгс) для молотка с бойком, изготовленным из электротехнической стали Э-4 (а) и для стали 9ХС (б, в, г) от индукции и термообработки. p_a^{VIII} — удельная потребляемая мощность молотка с бойком из стали 9ХС без термической обработки; p_a^o — с отожженным бойком; p_a^T — с закаленными торцами бойка до твердости $HR_c = 47 \div 49$; p_a^n — с закаленным бойком до твердости $HR_c = 57 \div 59$ с последующим отпуском. Соответствующими индексами обозначены потери в меди катушки p_m и стали бойка $p_{c.б}$.

В практике, с целью уменьшения электрических потерь, магнитопроводы, работающие в переменных и пульсирующих магнитных полях, изготавливают наборными из листовой стали с улучшенными магнитными характеристиками. Нами был изготовлен боек, навитый из листов стали Э-4 (рис. 4, а), предварительно смазанной клеем БФ-2.

Затем были определены удельная потребляемая мощность p_a , удельные потери в меди p_m и в стали $p_{c.б}$ для молотка с этим бойком. Сравнивая указанные потери молотка с витым и цельнометаллическим бойком с пазами (p^{VIII} , p_m^{VIII} и $p_{c.б}^{VIII}$), определенными для молотка с термически необработанным бойком, который изготавливался из 9ХС (рис. 4, б), установили: потери в стали витого бойка $p_{c.б}$ почти в 2 раза меньше, чем в бойке из 9ХС, а потери в меди p_m возросли более чем в 2 раза. В целом удельная потребляемая мощность молотка с витым бойком возросла в 1,1—1,7 раза по сравнению с потребляемой мощностью молотка с бойком, изготовленным из стали 9ХС. Кроме того, технология изготовления витого бойка намного сложнее, чем технология изготовления бойка из стали 9ХС. Поэтому витой боек описанной конструкции изготавливать нецелесообразно.

Чтобы выявить влияние термической обработки на потери, проводились опыты с бойком без термической обработки, отожженным, с закаленными торцами и с бойком, закаленным по всей поверхности с последующим отпуском.

Из приведенных зависимостей (рис. 4) видно, что минимальные потери p_a^o , p_m^o у бойка с полным отжигом. Этого можно было ожидать, так как отжиг удаляет наклеп и способствует образованию крупных зерен, а увеличение величины зерна считается одним из эффективных средств улучшения магнитных свойств стали и уменьшения потерь на вихревые токи и гистерезис [5—7]. С увеличением индукции удельные потери p_a^o и p_m^o возрастают быстрее, чем величина индукции, а $p_{c.б}^o$ увеличиваются почти пропорционально росту индукции. Большой прирост $p_{c.б}^{VIII}$ наблюдается при $B_m = 17000—18000$ гс.

Потери p_a^T , p_m^T , $p_{c.б}^T$ для бойка с закаленными торцами больше, чем потери p_a^{VIII} , p_m^{VIII} , $p_{c.б}^{VIII}$ для бойка без термической обработки и еще больше p_a^o , p_m^o , $p_{c.б}^{VIII}$ для бойка с полным отжигом. При закалке бойка по всей поверхности до твердости $H_{Rc} = 57 \div 59$ потери p_a^n , p_m^n и $p_{c.б}^n$ — максимальные. Следует отметить, что удельные потери закаленного бойка без последующего отпуска на много больше, чем закаленного бойка до такой же твердости, но с полным отпуском. Это и понятно, так как при отпуске восстанавливаются в какой-то мере те магнитные свойства стали, которые она имела до закалки.

Заключение

1. При выборе материала бойка необходимо учитывать циклично-ударный режим его работы и выбирать материал с минимальным количеством вредных примесей. После термообработки устранять внутренние напряжения с одновременным получением оптимальных размеров зерна, обеспечивающих улучшение магнитных свойств стали и минимальные потери на вихревые токи и гистерезис.

2. Бойки электромагнитных молотков следует изготавливать из стали 9ХС, обеспечивающей минимальные удельные потери в меди и в стали при минимальной потребляемой мощности на единицу индукции бойка при средних и сильных магнитных полях,

3. Высверливание продольного отверстия в бойке уменьшает влияние поверхностного эффекта, позволяет лучше использовать боек как магнитопровод. Однако удельные потери молотка с бойком, в центре которого просверлено отверстие, больше чем у молотка с бойком без отверстия. Поэтому в бойках легких молотков изготавливать отверстия нецелесообразно.

4. Изготовленные на бойке продольные пазы уменьшают наведение вихревых токов и уменьшают влияние поверхностного эффекта. Для бойка диаметром 28 мм, изготовленного из стали 9ХС, целесообразно делать 6—8 пазов шириною 1 мм и глубиною 7—8 мм. В таком случае удельные потери в меди катушки и в стали бойка, а также потребляемая мощность на единицу индукции (при $B_m = 14—15$ кгс) уменьшаются в 2—2,5 раза. Большое количество пазов изготовлять на данном диаметре бойка не следует, так как это приведет к уменьшению к. п. д. молотка.

5. Боек, изготовленный из стали 9ХС, необходимо отжигать, затем производить закалку только торцов бойка и делать отпуск. После такой термической обработки боек имеет достаточную механическую прочность при циклично-ударном режиме работы и обеспечивает минимальные удельные потери.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Ряшенцев, А. В. Иванов. Соленоидные молотки для монтажных работ. Техничко-экономический бюллетень Кемеровского совнархоза, № 10, 1960.
2. Н. П. Ряшенцев, Е. М. Тимошенко. Экспериментальное исследование рабочего процесса и энергетики соленоидного молотка со свободным выбегом бойка. Известия ТПИ, том 123, изд. ТГУ, 1963.
3. Н. П. Ряшенцев, О. Д. Алимов, Е. М. Тимошенко, А. В. Фролов. Соленоидный молоток. Авторское свидетельство № 132578 от 18 февраля 1960.
4. Н. П. Ряшенцев, А. В. Фролов, Е. М. Тимошенко. Магнитопровод соленоидного молотка. Авторское свидетельство № 139622 от 16 декабря 1960.
5. А. С. Займовский, Л. А. Чудновская. Магнитные материалы. Госэнергоиздат, 1957.
6. А. С. Займовский, В. В. Усов. Металлы и сплавы в электротехнике. Госэнергоиздат, 1941.
7. Б. Г. Лившиц. Физические свойства металлов и сплавов. Машгиз, 1956.