

**В. М. КОНСТАНТИНОВ**, канд. техн. наук, **Г. А. ТКАЧЕНКО** (БНТУ),  
**И. С. СУШКО** (РУП «Минский завод шестерен»)

## **ЭЛЕКТРОХИМИКОТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КРЕПЕЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН**

Одним из факторов, ограничивающих срок эксплуатации корпусов плугов, является повышенный износ головки болта, приводящий к нарушению целостности конструкции. В результате этого износа происходит отрыв лемеха или долота от корпуса плуга.

Высокая интенсивность изнашивания головки болта обусловлена многократным воздействием абразивных частиц почвы.

Износ головки болта зависит от ряда факторов:

- типа почвы;
- скорости движения плуга (особенно после 7 км/ч);
- времени года (уплотнение почвы);
- влажности почвы;
- потока почвы (ламинарный или турбулентный);
- свойств покрытия.

В настоящее время для крепежа рабочих элементов плуга используются болты из стали 20 и 40Х. Болты изготавливают методом ОМД, при котором происходит наклеп всех поверхностей болта. Твердость головок болтов составляет 20 HRC (сталь 20), 30 HRC (сталь 40Х).

При работе в полевых условиях ресурс болтов, установленных на долото и лемех, составляет всего 5–10 га вспаханной земли из расчета на один корпус плуга, что в полтора раза ниже ресурса болтов фирмы Kverneland. При изготовлении болтов фирма Kverneland использует сталь, химический состав которой примерно соответствует стали 20Г. Твердость головки болта 30 HRC (рис. 1).

Выполненный анализ свидетельствует, что применение износостойких диффузионных покрытий позволит увеличить стойкость поверхности головки болта, тем самым повысив срок эксплуатации болтов отечественного производства.



Рис. 1. Крепежные элементы корпусов плугов: а – МЗШ (сталь 20); б – Kverneland; в – МЗШ (сталь 40Х)

Наиболее широко используемым методом повышения износостойкости поверхности изделия является газовая цементация или нитроцементация с последующей закалкой и отпуском. Данный способ химико-термической обработки позволяет получить износостойкий слой толщиной более 1 мм. Однако использование газовой цементации для повышения износостойкости поверхности головки болта затруднительно, так как возникает необходимость защиты резьбы от насыщения. Для локального насыщения стали углеродом наиболее целесообразно использование высокотемпературной цементации или нитроцементации из паст с использованием нагрева

током высокой частоты. Данный метод позволяет совмещать нагрев под закалку с диффузионным насыщением, что значительно сокращает продолжительность процесса. За счет использования электрохимикотермической обработки удается получать за несколько минут слои такой же величины, как при газовой цементации в течение нескольких часов.

Физические причины ускорения диффузии при электрохимикотермической обработке заключаются в воздействии на диффузионные процессы сложной многофакторной системы. С одной стороны, это высокая температура процесса насыщения (порядка 1100 °С), скоростной индукционный нагрев, оказывающий влияние на скорость и температуру фазовых превращений, а с другой – магнитные свойства ферромагнитного материала, на которые воздействует переменное магнитное поле, возникающее при нагреве токами высокой частоты.

Важнейшей особенностью скоростного индукционного нагрева является значительное изменение скорости и температуры фазовых превращений. С повышением скорости нагрева фазовые превращения смещаются в область более высоких температур и их продолжительность снижается. При изменении скорости нагрева и соответственно продолжительности воздействия температуры и фазовых превращений может существенно измениться не только кинетика, но и механизм образования аустенита. Если при медленном нагреве образование аустенита происходит только в результате диффузионных процессов, то при быстром нагреве аустенит образуется по механизму бездиффузионного образования. В доэвтектоидной стали этот процесс может проходить на неоднородностях в ферритной фазе – по границам зерен и блоков мозаики [1].

Смещение фазовых превращений в область высоких температур оказывает существенное влияние на размер зерна аустенита в момент окончания фазовых переходов, что связано с возрастанием роли зарождения и уменьшением роли роста зерен в общем процессе образования аустенита с повышением температур. При этом процесс роста зерен аустенита замедляется ввиду резкого сокращения времени нагрева. Таким образом, возможно, что процесс будет представлять собой только зарождение центров.

Уменьшение объема зерен и увеличение их числа приводит к возрастанию протяженности границ. В то же время интенсивность

диффузии вдоль границ и внутри зерен существенно различается. При определенных температурах скорость граничной диффузии на пять-семь порядков выше скорости диффузии по зерну. Следовательно, в более мелкозернистом аустените, обладающем большей протяженностью границ, насыщение должно проходить значительно быстрее, чем в крупнозернистом [1, 2]. Установлено, что в температурном интервале 500–900 °С и в  $\gamma$ -области наблюдается преимущественная диффузия углерода по границам зерен [1].

Проблема описания влияния переменного магнитного поля на диффузию в железе в ферритном и парамагнитном состояниях весьма сложна, поскольку затрагивается влияние множества факторов и явлений ферромагнетизма. Это низко- и высокотемпературная магнитострикция, высокотемпературная магнитная структура доменов, взаимодействие доменных границ и границ зерен поликристаллов, влияние переменного магнитного поля на изменение концентрации дислокаций.

При внесении ферромагнитного материала в переменное магнитное поле изменяются его линейные размеры, а в полях высоких напряжений изменяется и объем. Изменение объема ферромагнитной матрицы может быть связано как со смещением атомов кристаллической решетки из первоначальных положений равновесия, т. е. изменением межатомного состояния, так и с изменением количества дефектов кристаллической структуры. Оба эти фактора могут влиять на диффузию в ферромагнетике.

При возникновении магнитострикционных деформаций соседние атомы решетки сместятся относительно друг друга в направлениях, совпадающих с направлением внешнего магнитного поля. Магнитострикция обусловлена обменным взаимодействием (квантово-механический эффект электростатической природы) и чисто магнитным взаимодействием атомных магнитных моментов. Значения константы магнитострикции  $\lambda = \Delta L/L$  ( $\Delta L$  – суммарное изменение длины образца;  $L$  – длина самого образца) могут быть как положительными, тогда образец удлиняется, так и отрицательными, тогда наблюдается сжатие в направлении действия магнитного поля [3].

Так как магнитострикция стали положительна (рис. 2) при определенных значениях намагниченности, происходит растяжение образца. За счет этого изменения параметра решетки должно происходить изменение величины потенциального барьера, который

должен преодолеть диффундирующий атом. В этом случае должно наблюдаться ускорение диффузии. Согласно литературным данным возрастание напряженности магнитного поля сказывается на коэффициенте объемной диффузии [3].

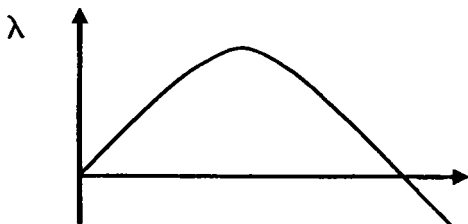


Рис. 2. Магнитострикция поликристаллического железа [3]

Теоретически ускорение диффузии осуществляется благодаря вакансиям. Влияние магнитного поля на диффузионный процесс в ферромагнетике может быть реализовано через изменение концентрации дислокаций в диффузионной зоне при включении ПМП. Как показано в [4], наложение ПМП приводит к изменению концентрации дислокаций на величину

$$\Delta N = N \left\{ \exp \left[ n \left( \frac{\Delta \tau_n - \mu_0 (\chi_\alpha - \chi_\beta) H^2 - 2(\sigma_n / r_n - \sigma / r)}{kT} \right) \right] - 1 \right\},$$

где  $N$  – исходная концентрация дислокаций единичной длины в единице объема;  $n$  – число компланарных дислокаций в плоских скоплениях;  $\Delta \tau_n$  – напряжение сдвига, равное разнице магнитострикционных и сторонних напряжений;  $\chi_\alpha$  и  $\chi_\beta$  – магнитные восприимчивости дислокации и матрицы соответственно;  $H$  – напряженность ПМП;  $\sigma_n$  и  $\sigma$  – поверхностное натяжение на границе «дислокация – матрица» в намагниченном и ненамагниченном состояниях;  $r_n$  и  $r$  – геометрические параметры дислокации в ПМП и без него. Таким образом,  $\Delta N$  определяется величиной магнитострикционных и сторонних напряжений, различием в магнитных

свойствах дислокаций и матрицы и изменением механического состояния объемов, занимаемых дислокациями, выражающимися в изменении их поверхностной энергии и величины активационного объема. Если предположить, что дислокация обладает собственным магнитным моментом, то при помещении образца в магнитное поле в результате взаимодействия магнитного момента дислокации с ним может изменяться энергия дислокаций. В результате этого число дислокаций, способных преодолеть потенциальный барьер  $U$ , возрастает, и согласно [5]

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{U - \alpha IH}{kT}\right)$$

становится равным, где  $I$  – магнитный момент дислокации;  $\alpha$  и  $n_0$  – константы;  $H$  – напряженность магнитного поля. Это может привести к перераспределению и изменению концентрации дислокаций и, как следствие, изменению эффективного коэффициента диффузии  $D_{\text{эфф}}$ .

Таким образом, переменное магнитное поле формирует наилучшую структуру для диффузионного насыщения, а высокая температура процесса позволяет увеличить глубину проникновения диффундирующих атомов.

Для исследования структурообразования диффузионных слоев при использовании электрохимикотермической обработки был изучен процесс высокотемпературной нитроцементации из паст стальных деталей.

Локальное насыщение стали проводили, используя специальную активную пасту. Компоненты пасты в порошкообразном состоянии замешивались на воде до состояния однородной вязкой массы. Нагрев осуществляли с помощью тока высокой частоты. Образцы нагревали до температур 1100 °С с последующей выдержкой от 30 до 200 с. Затем проводили закалку.

При данном способе диффузионного насыщения на образцах (сталь 20) формировались слои величиной от 0,06 до 0,40 мм. Увеличение температуры насыщения от 1100 до 1300–1400 °С приводит к образованию на поверхности образца жидкометаллической фазы, что позволяет получить на стали 20 за 90 с слой в 330 мкм,

где помимо нитроцементованного слоя образуется ледебуритный слой величиной 30–40 мкм.

Металлографический анализ структуры позволил установить следующее: после нитроцементации при 1100 °С и последующей закалки формируется диффузионный слой, состоящий из игольчатого мартенсита и остаточного аустенита (рис. 3). После ЭХТО при 1300 °С поверхность болта подплавляется и диффузионный слой состоит из игольчатого мартенсита и остаточного аустенита, а также участка ледебурита (рис. 4).

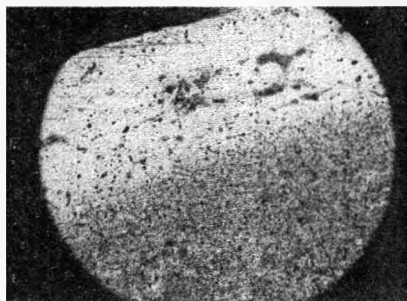


Рис. 3. Структура стали 20 после нитроцементации при 1100–1200 °С.  $\times 350$

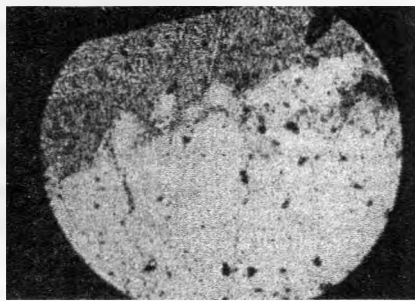


Рис. 4. Структура стали 20 после нитроцементации при 1300–1400 °С,  $\times 500$

Диффузионные слои, полученные при помощи ЭХТО, имеют высокую твердость (рис. 5). После насыщения при температуре 1100 °С максимальная твердость составляет 9000 МПа.

Таким образом, процесс упрочнения стальной поверхности нитроцементацией из паст с использованием нагрева токами высокой частоты позволяет получить слой величиной от 0,06–0,45 мм с твердостью 8500–9000 МПа в зависимости от режимов электрохимикотермической обработки. Структурообразование слоя может протекать как в твердофазном режиме, так и при локальном оплавлении поверхности с образованием эвтектических структур. Наличие жидкометаллической фазы существенно интенсифицирует процесс, обеспечивая формирование износостойкого сплава на поверхности детали [9].

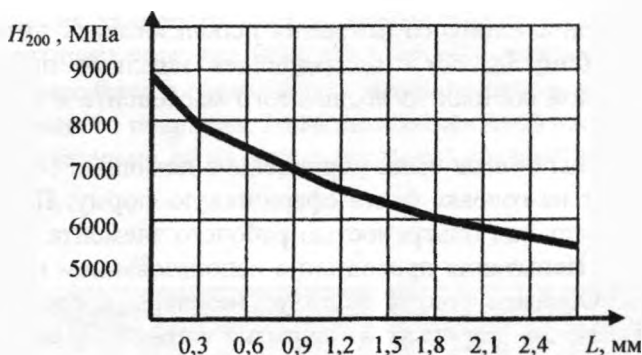


Рис. 5. Микротвердость стали 20 после высокотемпературной нитроцементации и закалки

Традиционная нитроцементация в печах, наплавка твердых материалов как способы повышения износостойкости рабочих поверхностей деталей давно зарекомендовали себя. Представляет интерес сравнение износостойкости диффузионных слоев, полученных высокотемпературной нитроцементацией из паст, с применением нагрева токами высокой частоты.

Для определения наиболее предпочтительного покрытия проведены полевые испытания, для которых была изготовлена опытная партия болтов из стали 20 с двумя типами покрытий.

Наплавку и диффузионное насыщение проводили с помощью индукционного нагрева (рис. 6).

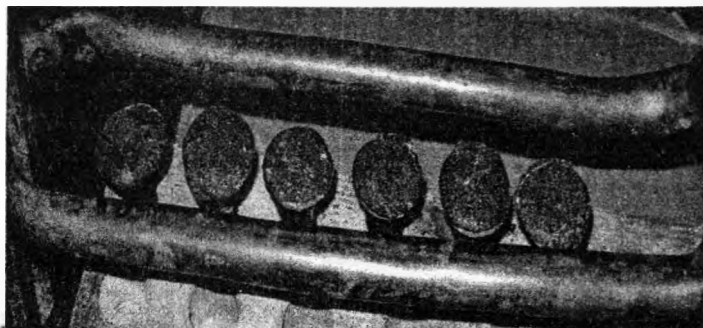


Рис. 6. Устройство для проведения технологического процесса



В качестве износостойкого покрытия использовалась нитроцементация на глубину 0,3 мм с последующей закалкой, при этом диффузионный слой состоял из игольчатого мартенсита и остаточного аустенита.

Другие образцы болтов были упрочнены с помощью сормайт, который образует на головке болта сферическую форму. Полученный слой выступает над поверхностью рабочего элемента корпуса плуга на 1,5 мм. Испытания проводили с использованием пятикорпусного плуга. Образцы болтов были установлены в следующем порядке: на 1-, 3-, 5-м корпусах – покрытие сормайт, а на 2-, 4-м корпусах – нитроцементация.

При полевых испытаниях было вспахано 72 га суглинистой почвы с большим количеством камней, что составляет примерно 15 га на один корпус плуга. До установки болтов было произведено взвешивание и измерение высоты головки. После испытаний износ болтов определялся остаточной массой и высотой головки. Полученные данные сведены в табл. 1.

Таблица 1. Показатели среднего износа болтов

Тип покрытия	Твердость покрытия, HRC	Величина износа головки болта, мм	Величина износа, г
Износ болтов, установленных на долото			
Нитроцементация с закалкой ТВЧ	63	3,4	15,1
Сормайт	55	5,5	24,8
Износ болтов, установленных на лемех			
Нитроцементация с закалкой ТВЧ	63	1,8	9,52
Сормайт	55	2,9	15,46

Анализ характера износа болтов после испытаний свидетельствует о следующем:

- износ головок болтов с наплавленным слоем неравномерный (болт № 1), часть покрытия остается на поверхности или изнашивается полностью (болт № 2), что указывает на неравномерность рас-

пределения твердости слоя и неравномерность давления абразивных частиц на определенных участках наплавленного слоя;

- износ болтов после нитроцементации равномерный в отличие от наплавленного покрытия. Геометрия посадочной части болта сохранена, следовательно, не нарушена прочность соединения (рис. 7, 8).

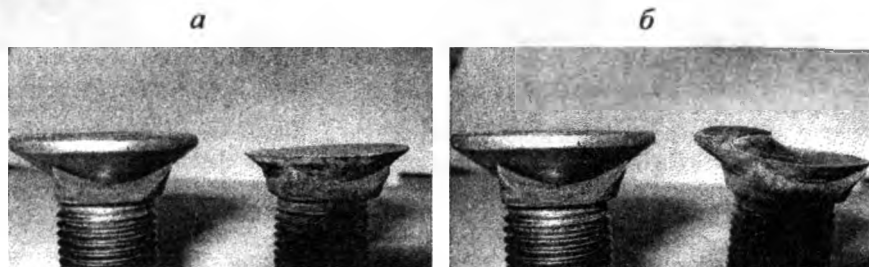


Рис. 7. Степень износа головок болтов с наплавленным слоем: а – относительный износ головки болта с диффузионным покрытием; б – относительный износ головки болта с наплавкой



Рис. 8. Износ головки болта с диффузионным покрытием

Для визуального сравнения износа до и после полевых испытаний приведен рис. 9.

На основании результатов исследований износостойкости, приведенных в табл. 1, построена зависимость среднего линейного износа головки болта от пройденных гектаров (рис. 10).

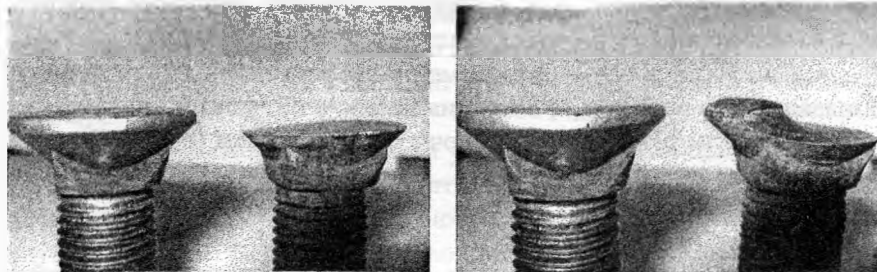


Рис. 9. а – относительный износ головки болта с диффузионным покрытием; б – относительный износ головки болта с наплавкой

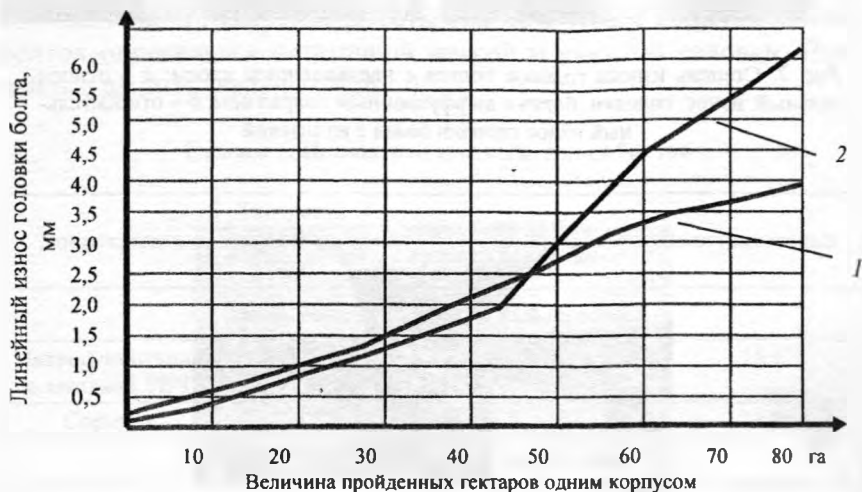


Рис. 10. Абразивная износостойкость головок болтов: 1 – диффузионное покрытие; 2 – наплавка

Контроль линейных параметров головки болта с периодичностью 10 га в течение испытания позволил установить, что наплавка изнашивается меньше, чем диффузионное покрытие на первых этапах работы плуга. Это объясняется высокой твердостью наплавочного материала 55 HRC и структурой наплавленного слоя. Слой на-

плавки составляет всего 1,5 мм, которые стираются уже после 40 га обработки земли, при этом обнажая неупрочненный металл болта твердостью 20 HRC. Именно по этой причине резко повышается износ головок крепежных элементов.

Головки болтов, упрочненные с помощью высокотемпературной нитроцементации и последующей закалкой, в работе в полевых условиях на протяжении 72 га изнашивались равномернее и менее интенсивно, чем наплавка. Это обусловлено равномерным распределением твердости по поверхности и высоте головок болтов. Твердость на головках болтов до испытания составляла 63 HRC.

В полевых испытаниях был также исследован износ болтов, установленных на лемехах корпусов плуга. Это были болты с наплавочным и диффузионным покрытиями. Результаты испытаний представлены на рис. 11.

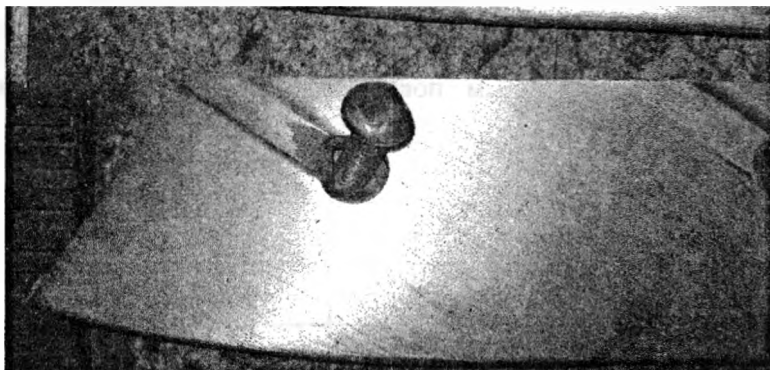


Рис. 11. Степень износа болтов, установленных на лемеха корпуса плуга: а – диффузионное покрытие; б – наплавка

Степень износа болтов, установленных на лемеха корпуса плуга с наплавленным слоем, составляет в среднем 2,9 мм, а с диффузионным покрытием – 1,8 мм. Наплавленный слой изнашивается неравномерно.

В полевых испытаниях использовались болты с наплавкой и диффузионным покрытием для крепления долот к корпусам плуга. Величина износа головок болтов с наплавленным слоем составляет 3,65–6,40 мм, а величина износа головок болтов с диффузионным покрытием – 2,95–3,65 мм от исходной высоты головки болта.

Повышенный износ головки болта с наплавленным слоем можно объяснить сферической формой, которую образует наплавленный слой. Он выступает над поверхностью рабочего элемента плуга, вызывая неравномерное распределение давления абразивных частиц и турбулентное движение земли. В этом случае при работе в полевых условиях наплавленный слой изнашивается интенсивнее, и за ним в теле рабочего элемента плуга образуется участок повышенного износа, что не допустимо (рис. 12).



*Рис. 12.* Износ головки болта, упрочненного наплавкой, после полевых работ

Эту проблему можно решить лишь углублением посадочного отверстия под болт на величину наплавленного слоя, что влечет изменения в конструкторской документации, дополнительные затраты.

Диффузионное покрытие дает ровную поверхность и высокую твердость головок болтов, увеличивает срок эксплуатации крепежных изделий (болтов) без необходимости изменения конструкции рабочих элементов корпусов плугов. В пользу ЭХТО из паст говорит и тот факт, что стоимость обработки одной единицы продукции будет ниже, чем применение наплавки, так как стоимость 1 кг порошка составляет примерно 15 у. е., а 1 кг порошка для нитроцементации стоит 10 у. е. Расход порошков на один болт составляет 20 и 10 г. Следовательно, на один пятикорпусной плуг требуется установка 35 упрочненных болтов и понадобится 700 г порошка

для наплавки стоимостью 10,5 у. е. А для высокотемпературной нитроцементации необходимо 350 г стоимостью 3,5 у. е. Выполненные работы свидетельствуют об эффективности и целесообразности использования высокотемпературной нитроцементации из паст для упрочнения болтов отечественного производства.

Работа выполнена в рамках задания 1.49 ГНТП «Технология машиностроения».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Кидин, И. Н.* Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов / И. Н. Кидин. – М.: Металлургия, 1969. – 376 с.
2. *Алиев, А. А.* Борирование из паст / А. А. Алиев, Л. Г. Ворошнин. – А.: Астраханский гос. техн. ун-т, 2006. – 288 с.
3. Диффузионные процессы в металлах под действием магнитных полей и импульсных деформаций / В. Ф. Мазанко [и др.]. – М.: Машиностроение, 2006. – II т. – 323 с.
4. *Постников, С. Н.* О влиянии внешнего магнитного поля на дислокационные образования в твердых телах / С. Н. Постников, В. П. Сидоров // Прикладные проблемы прочности и пластичности: всесоюз. межвуз. сб. – Горький: ГГУ им. Лобачевского, 1980. – С. 165–168.
5. *Изгодин, А. К.* Исследование прочностных свойств ферромагнитного сплава Fe-Si-Al в магнитном поле / А. К. Изгодин, Г. А. Шипко // ФММ. – 1983. – Т. 56. – Вып. 6. – С. 1227–1230.
6. Электрохимико-термическая обработка металлов и сплавов / И. Н. Кидин [и др.]. – М.: Металлургия, 1978. – 320 с.
7. Физические основы электротермического упрочнения стали / В. Н. Гриднев [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1973. – 336 с.
8. Восстановление деталей машин: справочник / Ф. И. Пантелесенко [и др.]; под ред. В. П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
9. *Ткаченко, Г. А.* Анализ структурообразования диффузионных слоев из паст с применением нагрева токами высокой частоты / Г. А. Ткаченко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. – 2007. – Т. 2 – С. 204–206.