

УДК 621.7

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КРЕПЕЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛУГОВ

Г.А. ТКАЧЕНКО

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Разработана технология упрочнения крепежных элементов корпусов плугов. Для локального упрочнения болтов применена электрохимико-термическая обработка (ЭХТО) в сочетании с термоциклической обработкой (ТЦО), что позволило упрочнить крепежные элементы, не снизив класс прочности. Отмечены факторы ускорения диффузии при ЭХТО и ТЦО.

Повышение износостойкости крепежных элементов заключается в большей твердости головки болта, а также в микроструктуре легированного мартенсита. Использование износостойких крепежных элементов с мелкозернистой структурой позволяет исключить преждевременные замены, обеспечить полную выработку рабочих органов корпусов плугов.

Одним из факторов, лимитирующим ресурс эксплуатации режущих элементов корпусов плугов, в условиях тяжелых почв Беларуси является повышенный износ головки болта, который обусловлен постепенным «вымыванием» почвой мягкого металла крепежного элемента в посадочном отверстии рабочего органа (рис. 1), что приводит к преждевременному нарушению целостности конструкции. В результате этого износа происходит отрыв долота от корпуса плуга.

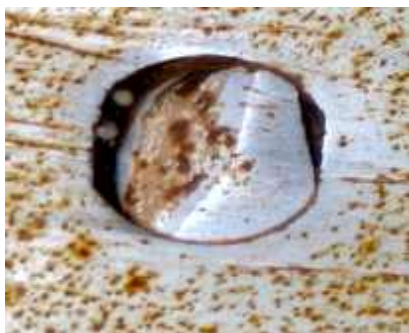


Рис. 1. Износ головки крепежного элемента

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

Износ головки болта зависит от ряда факторов: типа почвы; скорости движения плуга (не более 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 сталей 20 и 40Х. Крепежные элементы (сталь 20) изготавливают высадкой без термической обработки. После такой обработки твердость болта составляет 20 HRC. Болты из стали 40Х изготавливают высадкой с последующей закалкой и высоким отпуском, т.е. имеет место улучшение их свойств. После обработки твердость принимает значение 30 HRC. Полученные таким способом болты имеют высокую прочность 400...600 Н/мм², но обладают малой износостойкостью. При работе в полевых условиях ресурс болтов, установленных на долото и лемех, составляет всего 5...15 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 – 35 HRC. Следует отметить, что повышенное изнашивание головки болта характерно для почв Беларуси, обладающих высоким абразивным воздействием.

Анализ существующих технологий упрочнения болтов. Выполненный анализ свидетельствует, что применение износостойких диффузионных покрытий, наплавочных материалов [1], а также применение термической обработки позволит увеличить стойкость поверхности головки болта, тем самым повысить срок эксплуатации болтов отечественного производства.

Наиболее широко используемыми методами повышения износостойкости поверхности изделия является газовая цементация, или нитроцементация, с последующей закалкой и отпуском. Данный способ химико-термической обработки (ХТО) позволяет получить износостойкий слой толщиной более 1 мм со структурой мартенсита отпуска и остаточного аустенита. Однако использование газовой цементации (нитроцементации) для повышения износостойкости поверхности головки болта затруднительно, так как возникает необходимость защиты резьбы от насыщения, а в структуре детали происходит интенсивный рост зерна, что приводит к снижению механических свойств готового изделия. Поэтому использование объемного способа ХТО и ТО для повышения износостойкости поверхности головки болта неприемлемо, так как после таких операций по сечению болта образуется структура мартенсита, которая обладает высокой износостойкостью, но при этом является хрупкой. Болты, обработанные объемным способом, могут разрушаться в процессе эксплуатации.

Использование наплавочных материалов дает возможность получить на крепежном элементе сочетание прочностных свойств стержня и износостойкости головки болта. В результате на поверхности формируется твердое (50...55 HRC) износостойкое покрытие с большим количеством карбидов, а микроструктура стержня и головки состоит из ферритно-перлитной структуры, которая обеспечивает прочностные свойства.

Однако наплавка оказалась недостаточно эффективной в полевых условиях по следующим причинам: наплавленный слой на головке болта образует сферическую форму, которая выступает над поверхностью рабочего органа плуга, вызывая повышение давления абразивных частиц почвы и турбулентное движение земли, что приводит к интенсификации износа покрытия и поверхности долота или лемеха. Изнашивается покрытие неравномерно, часть покрытия остается на поверхности или изнашивается полностью (рис. 2), обнажая мягкую ферритно-перлитную структуру головки болта твердостью 80...90 HRB, что резко повышает износ крепежных элементов. Также отрицательной стороной наплавки поверхности головок болтов является и стоимость технологической операции, которая превышает стоимость болта в 2 раза, а при этом повышение износостойкости достигается лишь в 1,3 раза [2].



Рис. 2. Износ головок болтов с наплавленным покрытием

Анализ применяемых технологий и полевых испытаний позволил установить, что для повышения ресурса эксплуатации крепежного элемента необходимо, чтобы твердость поверхности головки болта была равной или выше твердости закрепляемой детали, а головка болта была ниже поверхности рабочего элемента, кроме того должны быть сохранены прочностные свойства изделия.

На основании литературных данных для локального упрочнения и 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 электрохимико-термической обработки удается получать за несколько минут слои такой же величины, как при газовой цементации в течение нескольких часов.

Физические причины ускорения диффузии при электрохимико-термической 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. Изменение скорости нагрева и, соответственно, продолжительность воздействия температуры и фазовых превращений могут существенно изменить не только кинетику, 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 [4].

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 различаются. При определенных температурах скорость граничной диффузии на пять-семь порядков выше скорости диффузии по зерну. Следовательно, в более мелкозернистом аустените, обладающем большей протяженностью гра-

ниц, насыщение должно проходить значительно быстрее, чем в крупнозернистом аустените [6]. Известно, что в температурном интервале 500...900 °С и в γ -области наблюдается преимущественная диффузия углерода по границам зерен [6].

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

Исследования формирования диффузионных слоев при электрохимико-термической и термоциклической обработке. Для исследования структурообразования диффузионных слоев при использовании электрохимико-термической обработки был изучен процесс высокотемпературной нитроцементации из паст стальных деталей. Локальное насыщение стали проводили используя специальную активную пасту и индукционный нагрев. При данном способе диффузионного насыщения на образцах (сталь 20, сталь 40Х) формировались диффузионные слои толщиной от 0,06 до 0,9 мм. Металлографический анализ микроструктуры позволил установить следующее: после нитроцементации при 1100 °С и последующей закалки формируется диффузионный слой, состоящий из игольчатого мартенсита и остаточного аустенита (рис. 3). Увеличение температуры насыщения с 1100 до 1200...1300 °С приводит к образованию на поверхности образца жидкометаллической фазы, что позволяет получить на стали 40Х за 90 секунд слой белого доэвтектического чугуна толщиной 0,9 мм. Такой же эффект от увеличения температуры насыщения наблюдается и на стали 20, где помимо нитроцементованного слоя образуется ледебуритный слой толщиной 30...40 мкм.

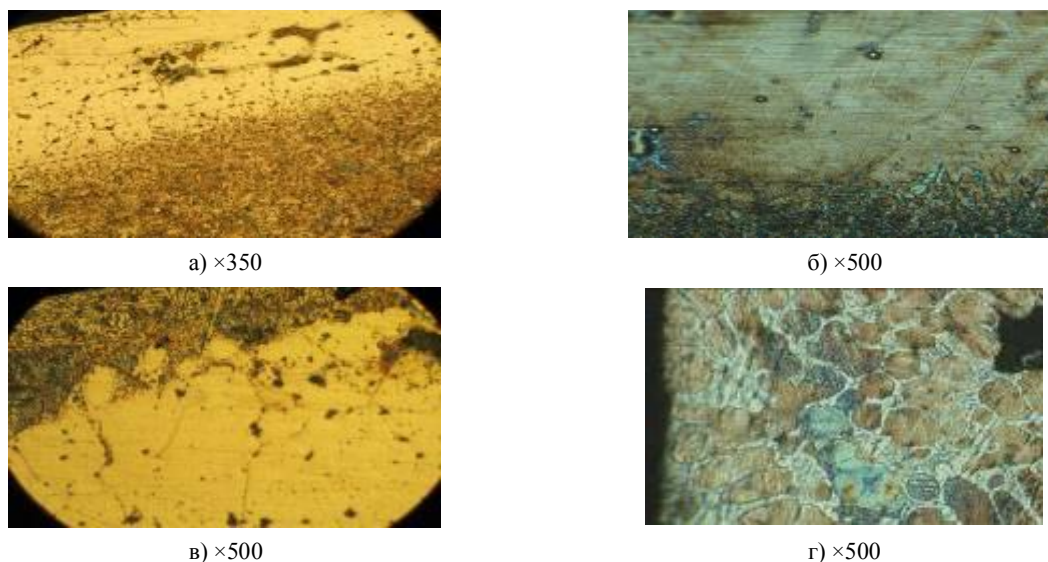


Рис. 3. Структура диффузионного слоя после нитроцементации:
а – сталь 20 при 1100 °С; б – сталь 40Х при 1100 °С;
в – сталь 20 при 1200...1300 °С; г – сталь 40Х при 1200...1300 °С

Диффузионные слои, полученные при температуре 1200 °С с помощью ЭХТО и закалки, имеют максимальную твердость 9000 МПа, а слои, полученные при температуре 1200...1300 °С, – 12000 МПа, что иллюстрирует рисунок 4.

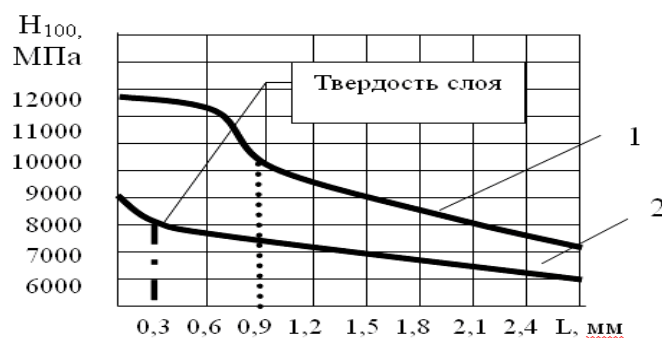


Рис. 4. Микротвердость стали после нитроцементации и закалки:
1 – сталь 40Х; 2 – сталь 20

Таким образом, процесс упрочнения стальной поверхности нитроцементацией из паст с использованием нагрева токами высокой частоты позволяет получить слой толщиной 0,06...0,9 мм с твердостью 9000...12000 МПа, в зависимости от режимов электрохимико-термической 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 [3].

Существенным недостатком процесса высокотемпературной нитроцементации из паст с нагревом токами высокой частоты является интенсивный рост зерна по сечению головки болта, что приводит к снижению ударной вязкости. Применяемые болты М12 (класс прочности 5.8) должны выдерживать нагрузку при ударе во время эксплуатации без разрушения. Для сохранения механических свойств изделия нужна мелкозернистая структура. Поэтому необходимо проведение дополнительной термической обработки для измельчения полученной структуры, а наиболее целесообразно совмещение процесса диффузионного насыщения и фазового измельчения структуры обрабатываемых деталей, поэтому была применена термоциклическая обработка.

Технология термоциклической обработки заключается в многократном воздействии на металлическую матрицу ускоренным изменением температуры при нагревах и охлаждениях с целью быстрого и принудительного формирования необходимых параметров структуры и получения нужных, более высоких механических свойств по сравнению с традиционными способами упрочнения.

Применение многократной фазовой перекристаллизации в процессе ЭХТО приведет к значительному измельчению структуры детали. Это позволит локально упрочнять крепежные элементы без снижения прочности.

Процесс упрочнения заключался в электронагреве образцов до температуры диффузионного насыщения, в выдержке с последующим охлаждением на воздухе до температуры 650 °С. Количество циклов составило от 2 до 8, общая продолжительность процесса от 2 до 6 минут. В результате многократной фазовой перекристаллизации, в зависимости от количества циклов, было сформировано зерно размером 10...14 баллов; наименьшее зерно было получено после 8 циклов (рис. 5).

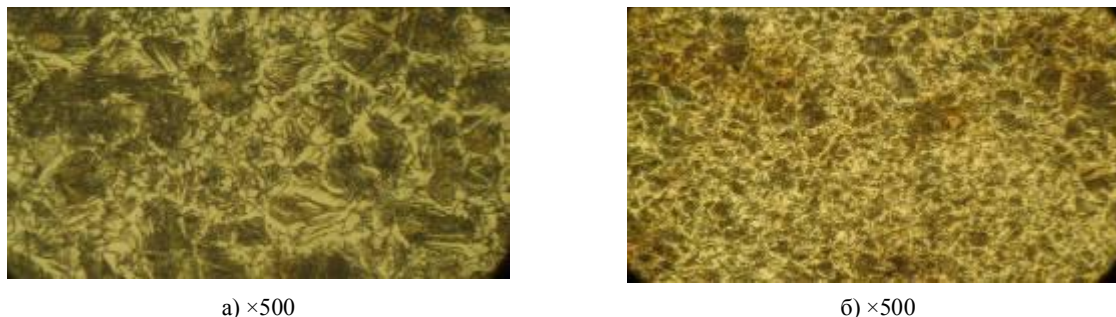


Рис. 5. Размер зерна на стали 20 в зависимости от количества циклов:
а – 2 цикла; б – 8 циклов

Такая многократная фазовая перекристаллизация связана с тем, что температура и величина зерна аустенита сильно влияют на продолжительность и параметры термоциклирования. При температуре диффузионного насыщения свыше 950 °С для измельчения структуры требуется повышенное число циклов. Это объясняется тем, что при высоких температурах аустенит становится гомогенным. При охлаждении такого высокотемпературного и крупнозернистого аустенита до температуры 650 °С центры зарождения новых зерен образуются только по границам аустенита, и при последующем термоциклировании требуется большее количество циклов, чтобы процесс зарождения новых зерен происходил по всему объему зерна аустенита.

После проведенных 1, 2, 4 и 8 циклов образцы подвергали закалке. После чего проводили исследования распределения микротвердости по глубине диффузионного слоя. В результате было замечено, что с ростом количества термоциклов микротвердость нитроцементированного слоя повышается (рис. 6). Такое повышение микротвердости в диффузионном слое можно объяснить тем, что после высокотемпературной нитроцементации из паст с последующей закалкой в слое наблюдается достаточное количество остаточного аустенита. Но в процессе многократной фазовой перекристаллизации от температур насыщения 1100 °С до 650 °С в высокоуглеродистом аустените будет происходить процесс перераспределения углерода и выделение по границам зерен цементита, что вызывает обеднение аустенита углеродом, и в результате аустенит становится менее устойчивым и распадается на перлит. При повторном нагреве выделившиеся частицы цементита практически не будут растворяться при температурах насыщения, так

как скорость нагрева высокая и поэтому времени для их растворения недостаточно, а образовавшийся из высокоуглеродистого аустенита перлит превращается в менее легированный углеродом аустенит. Повторное охлаждение до 650 °С увеличит количество распада остаточного аустенита и т.д. с каждым циклом.

Помимо измельчения зерна, увеличения микротвердости, удалось добиться и дополнительной интенсификации процесса диффузии. После двукратного циклирования был сформирован диффузионный слой глубиной 310 мкм, а после четырехкратной фазовой перекристаллизации – 380 мкм. В сердцевине образца после четырехкратного термоциклирования значительно сокращается количество феррита.

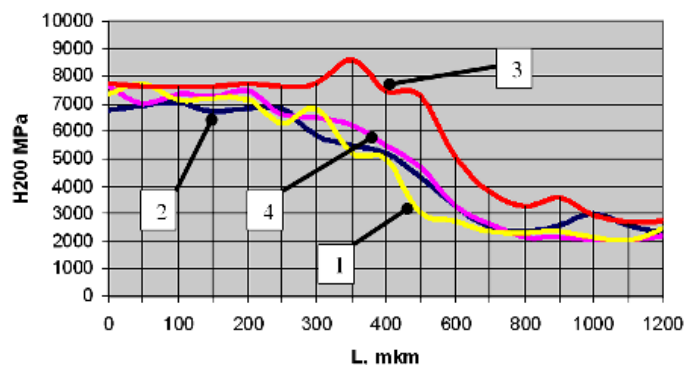


Рис. 6. Распределение микротвердости после ЭХТО с термоциклированием и закалкой:
1 – 1 цикл; 2 – 2 цикла; 3 – 4 цикла; 4 – 8 циклов

Интенсификацию диффузии и мелкозернистую структуру при термоциклировании можно объяснить следующим. В процессе многократной смены температуры в образце происходит микродеформация зерен металла от структурных и термических напряжений, в результате чего имеет место фазовый наклеп металла, который сопровождается рекристаллизацией. Интенсификация диффузии при термоциклировании возможна из-за наличия термодиффузии, происходящей в результате действия сил, вызванных изменением температуры [5].

В результате исследований удалось получить с помощью ЭХТО в сочетании с ТЦО износостойкий нитроцементированный слой на поверхности болта и сформировать мелкодисперсную структуру с размером зерна до 14 баллов, что позволило упрочнить изделие и сохранить механические свойства.

Традиционная нитроцементация, цементация в печах, закалка рабочих поверхностей деталей давно зарекомендовали себя. Представляет интерес сравнение износостойкости диффузионных слоев, полученных высокотемпературной нитроцементацией из паст с применением нагрева токами высокой частоты, с серийно выпускаемыми деталями и европейскими аналогами (например, Kverneland).

Для проведения полевых испытаний была изготовлена опытная партия болтов, который осуществлялся на специально спроектированной и изготовленной технологической оснастке, т.е. был изготовлен специальный индуктор для установки ТВЧ, который позволял одновременно обрабатывать до 14 деталей за одну технологическую операцию. Также был изготовлен держатель, предназначенный для установки болтов под индуктором.

В 4 квартале 2008 года на ГУ «БелМИС» проведены приемочные полевые испытания рабочих элементов корпусов плугов: груди отвала, полевой доски, долот, крепежных элементов. Испытания проведены в рамках выполнения основного задания 1.49 «Разработать и освоить комплекс технологий повышения долговечности корпусов плугов отечественного производства» государственной научно-технической программы «Технологии и оборудование машиностроения» (подпрограмма «Технологии машиностроения»). Для испытаний использовался 8-корпусной плуг, установленный на гусеничный трактор МТЗ. В ходе полевых испытаний было вспахано 585 га в трех агрокомбинатах на почвах: дерново-подзолистых, торфяно-глеевых, средних и легких суглинках. Твердость почв составила 4,2...8,9 МПа; засоренность камнями диаметром 65 мм (шт./м²) – от 1, 2; наработка на один корпус плуга – 73,1 га.

Результаты полевых испытаний представлены в таблице, из которой видно, что упрочненные болты изнашиваются в 1,7...2,0 раза менее интенсивно, чем серийно выпускаемые, их стойкость в 1,4 раза выше, чем у фирмы Kverneland.

Повышение износостойкости крепежных элементов заключается в большей твердости головки болта, а также в микроструктуре легированного мартенсита. Таким образом, использование износостойких крепежных элементов с мелкозернистой структурой позволяет исключить преждевременные замены, обеспечить полную выработку рабочих органов корпусов плугов.

Показатель износостойкости крепежных элементов

Серийно выпускаемый крепежный элемент для крепления	Твердость, HRC	Линейный износ, мм
Долота	30	4,60
Груди отвала	30	1,40
Полевой доски	30	0,20
Крепежный элемент Kverneland для крепления		
Долота	35	3,30
Груди отвала	35	1,0
Крепежные элементы, упрочненные ЭХТО и ТЦО для крепления		
Долота	63	2,55
Груди отвала	63	0,75
Полевой доски	63	0,1

Выводы. Рассмотренная в работе технология электрохимико-термической обработки в сочетании с термоциклированием позволяет осуществлять локальное упрочнение и получать крепежный элемент, в котором сочетаются механическая прочность и износостойкость.

С помощью ЭХТО и ТЦО можно получать диффузионные слои такой же глубины, как при газовой цементации за несколько часов, формировать на поверхности изделия различные структуры, ускорять процесс диффузии, получать мелкое зерно. Электрохимико-термическая обработка позволяет за 200 секунд сформировать слой 0,6 мм со структурой легированного мартенсита твердостью 9000 МПа.

Повышение во время диффузионного насыщения температуры до 1200...1300 °С приводит к образованию жидкометаллической фазы, благодаря чему на стали 40Х за 90 секунд формируется диффузионный слой толщиной 0,9 мм белого доэвтектического чугуна с твердостью 12000 МПа. Повышение глубины слоя, измельчение структуры вызывает и дополнительная термоциклическая обработка, в результате которой формируется мелкозернистая структура 10 ... 14 баллов.

Технология локального упрочнения крепежных элементов прошла успешные полевые испытания на ГУ «БелМИС», результатам которых показали увеличение ресурса эксплуатации крепежных болтов по сравнению с серийно выпускаемыми в 1,7...2,0 раза и в 1,4 в сравнении с Kverneland.

ЛИТЕРАТУРА

1. Восстановление деталей машин: справ / Ф.И. Пантелеенко [и др.]; под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
2. Константинов, В.М. / Электрохимико-термическая обработка крепежных элементов почвообрабатывающих машин / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко, И.С. Сушко // *Металлургия: республик. межведомств. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2008. – Вып. 31. – С. 358 – 371.
3. 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.
4. Электрохимико-термическая обработка металлов и сплавов / И.Н. Кидин [и др.]. – М.: «Металлургия», 1978. – 320 с.
5. Федюкин, В.К. Метод термоциклической обработки металлических материалов / В.К. Федюкин. – Л.: «Знание», 1979. – 24 с.
6. Диффузионные процессы в металлах под действием магнитных полей и импульсных деформаций / В.Ф. Мазанко [и др.]. – М.: Изд-во «Машиностроение», 2006. – Т. II. – 323 с.
7. Checkliste zur Mengenermittlung für den Bedarf an Original Kverneland Ersatzteilen [Electronic resource]: Products & Distribution / Kverneland. – Mode access: <http://www.kvernelandgroup.com>.
8. 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.
9. Steel heat treatment: metallurgy and technologies / George E. Totten, Portland State University / Portland, Oregon, U.S.A. 2007.

Поступила 06.05.2009