



УДК 621.7

В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко
(Белорусский национальный технический университет, г. Минск)
E-mail: v_m_konst@mail.ru

Упрочнение быстроизнашиваемых деталей почвообрабатывающих плугов нитроцементацией с локальным индукционным циклическим нагревом

Установлен ряд особенностей, связанных со структурированием нитроцементованных слоев, получаемых при помощи индукционной обработки, как при стационарном режиме, так и при циклическом нагреве. Выявлено, что циклическая обработка после нитроцементации измельчает структуру основного металла и поверхностного слоя, приводит к уменьшению остаточного аустенита в структуре диффузионного слоя, повышает твердость диффузионного слоя, а также ударную вязкость мартенсита.

Ключевые слова: индукционный циклический нагрев, локальное формирование износостойких структур, интенсификация высокотемпературной диффузии, мелкое зерно, вязкий мартенсит.

In our researches it was possible to establish a number of features connected with structurization diffusion the layers received by means of induction processing, both at a stationary mode, and at cyclic heating. Cyclic processing after nitrocementation crushes structure of the basic metal and a blanket, leads to reduction residual austenitic in structure diffusion a layer, hardness diffusion a layer and also impact strength martensite increases.

Keywords: induction cyclic heating, local formation of wearproof structures, an intensification of high-temperature diffusion, a fine grain, viscous martensite.

Почворезушие детали корпусов плугов, являющиеся изделиями массового потребления, относятся к быстроизнашивающимся сменным элементам. Технический уровень производства и ресурс элементов корпусов плугов, выпускаемых отечественными предприятиями, ниже, чем европейских производителей. Детали почвообрабатывающей техники отечественного производства имеют ресурс работы ниже западных аналогов в 1,5–2 раза и, как правило, не дотягивает до требований СТБ 1388–2003, где для оборотного долота ресурс должен составлять не менее 20 га.

Выпускаемые детали имеют низкие показатели на супесчаных и песчаных почвах и незначительно превышают показатели на торфяных, суглинистых и глинистых почвах. Небольшая наработка узла долото–болт объясняется тем, что происходит быстрый износ долота по длине и толщине. Во время работы на "тяжелых" почвах сильное влияние на ресурс детали оказывает износ головки болта, который обусловлен постепенным "вымыванием" почвой мягкого металла крепежного элемента в посадочном отверстии рабочего органа, что приводит к преждевременному нарушению целостности конструкции. В результате этого износа происходит отрыв долота от лемеха плуга.

В настоящее время для изготовления рабочих органов плугов используют конструкционную сталь 65Г. Для повышения износостойкости применяют *термическую обработку* (ТО), которая состоит из объемной закалки и среднего отпуска. При этом формируется структура троостита отпуска с твердостью 45...50 HRC.

Крепежные элементы плуга изготавливают из сталей 20 и 40Х. Болты (сталь 20) изготавливают холодной высадкой без дополнительной ТО, получая изделие со структурой феррита и перлита, которая обеспечивает твердость около 20 HRC и предел прочности 600 МПа. Болты из стали 40Х – горячей высадкой с последующей ТО, которая состоит из закалки и высокого отпуска, после такой операции формируется микроструктура сорбита отпуска с твердостью 30 HRC и пределом прочности 1100 МПа.

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.

Наиболее тяжело нагруженным, интенсивно изнашиваемым узлом корпуса плуга является долото–болт, назначение которого заключается в подрезании пласта почвы, ее подъема и направления на отвал. В процессе эксплуатации узел корпуса плуга подвергается воздейст-

вию абразивной массы, а также действию окружающей среды — коррозии, ударным нагрузкам.

Следовательно, в процессе упрочнения, учитывая условия эксплуатации данного узла корпуса плуга, необходимо повысить конструкционную прочность, т.е. комплекс прочностных свойств, которые обеспечат длительную и надежную работу материала в условиях эксплуатации. К таким свойствам можно отнести поверхностную твердость долота и болта, а также прочность и ударную вязкость.

Для согласованной и продолжительной работы узла необходимо, чтобы твердость головки болта была равной или больше твердости долота. Это требуется, чтобы исключить эффект "вымывания" из посадочного отверстия металла болта.

Крепежный элемент представляет собой стержень с внешней резьбой на одном конце и головкой на другом с однородной микроструктурой по сечению. Это обуславливает его механические характеристики, так как класс прочности зависит от предела прочности на растяжение: чем больше значение, тем выше класс болта.

Наиболее тяжело нагруженной частью болта является его резьбовая часть в месте соединения с головкой, где возникают крутящий момент, образующийся во время навинчивания гайки, и растягивающие напряжения при взаимодействии детали с внешней средой, головка болта, в свою очередь, подвергается воздействию абразивных частиц.

Исходя из условий работы крепежного элемента и нагрузок, целесообразно сохранить исходную микроструктуру феррита и перлита, сорбита или троостита на ножке болта, а на головке получить износостойкую структуру, например мартенсита.

Сочетание исходной микроструктуры резьбовой части и износостойкой на головке позволит сохранить класс прочности и улучшить трибологические свойства крепежных элементов, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания и при ударных нагрузках.

Оборотное долото представляет собой нож, имеющий рабочую часть в виде лезвий с двух сторон и центральную часть, в которой размещены крепежные отверстия. Эта деталь устанавливается на лемех, так что рабочая часть выступает вперед на 70 мм.

Таким образом, долото представляет собой консоль с жестким закреплением и все возникающие нагрузки воспринимаются именно крепежной частью долота, если нагрузка превышает предел прочности, то происходит излом в этой части, так как в ней расположены посадочные отверстия, которые являются концентраторами напряжений (рис. 1). Исходя из нагрузок и условий работы, на данной детали требуется получить следующие структуры: износостойкую, например мартенсит, на режущей части и на крепежной — пластичную, например троостит.

Для реализации схемы локального распределения микроструктур по сечению изделий необходимо исполь-



Рис. 1. Излом оборотного долота по концентраторам напряжений

зовать такую ТО, чтобы нагрев оказывал влияние на структурные превращения лишь на определенных участках детали. К такому виду упрочнения можно отнести *электрохимико-термическую обработку* (ЭХТО), локальную закалку, отпуск с индукционным нагревом, а благодаря тому что способ нагрева позволяет регулировать скорость, можно добиться высокой производительности процесса упрочнения.

В этом случае в качестве альтернативы традиционным способам объемной ХТО и ТО можно использовать высокоскоростное диффузионное насыщение поверхности сталей из порошков, газовой или жидкой сред с использованием индукционного нагрева, проводить ТО с циклическим нагревом.

Для крепежных элементов была рассмотрена возможность использования высокотемпературной нитроцементации из паст. Такой способ позволил получить на образцах (стали 20, 40Х) диффузионные слои толщиной от 0,06 до 0,9 мм. После нитроцементации при 1100 °С и последующей закалки формируется диффузионный слой, состоящий из игольчатого мартенсита и остаточного аустенита, микротвердостью 9000 МПа.

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 с слой толщиной 0,9 мм, состоящий из крупных зерен перлита, вокруг которых образуется ледебуритная эвтектика с высокой микротвердостью порядка 12 000 МПа. Такой же эффект от увеличения температуры насыщения наблюдается и на стали 20, где помимо нитроцементованного слоя образуется ледебурит толщиной 30...40 мкм [1].

Структуры, сформированные в диффузионном слое при частичном оплавлении поверхности, не приемлемы для использования в качестве защитных покрытий от абразивного воздействия. Оплавление проходит по границам зерен, где образуются участки высокотвердой ледебуритной эвтектики, что может привести к выкрашиванию и скалыванию диффузионного слоя при эксплуатации.

Другой особенностью ЭХТО при высоких температурах можно считать значительный теплоотвод к холодным областям образца. Поэтому применение этого способа для локального упрочнения крепежных элементов может привести к изменению исходных микроструктур

на крепежной части болтов, которые обеспечивают класс прочности.

Следовательно, данный способ обработки можно применить только для болтов из стали 20, где крепежная часть имеет структуры феррита и перлита. Для болтов из стали 40Х такой значительный теплоотвод к ножке болта приведет к уменьшению твердости сорбита, в результате этого снизится прочность детали. Поэтому для крепежных элементов из стали 40Х целесообразно использовать локальную закалку головки с последующим отпуском.

В работе было изучено влияние циклического нагрева на формирование диффузионного слоя при высокотемпературном насыщении из паст. Исследования показали, что циклический нагрев, заключающийся в перегреве образцов крепежных элементов из стали 20 на 200 °С выше точки A_3 и охлаждении до температуры ниже точки A_1 на 100 °С, приводит к интенсификации диффузионных процессов, измельчению микроструктуры слоя и основного металла, а также позволяет увеличить микротвердость.

Кинетика диффузионного насыщения с циклическим нагревом имеет сложную зависимость от числа циклов за единицу времени. Было установлено, что во время стационарного процесса, равного 2 мин, образуется слой толщиной 280 мкм. Четырехтактный циклический нагрев с изотермической выдержкой в аустенитной области по 30 с формирует слой 340 мкм. При увеличении частоты смены температурного режима до восьми скорость роста диффузионного слоя снижается, и кинетика насыщения стремится к стационарному режиму. Это можно объяснить тем, что кратковременных выдержек в высокотемпературной зоне при каждом цикле недостаточно для интенсивной диффузии углерода и азота в глубь стали.

Интенсификация процесса насыщения и формирование мелкозернистой структуры при *термоциклической обработке* (ТЦО) обусловлены следующим. При многократной смене температуры происходит микродеформация зерен из-за структурных и термических напряжений, в результате чего происходит фазовый наклеп металла, который сопровождается рекристаллизацией [2].

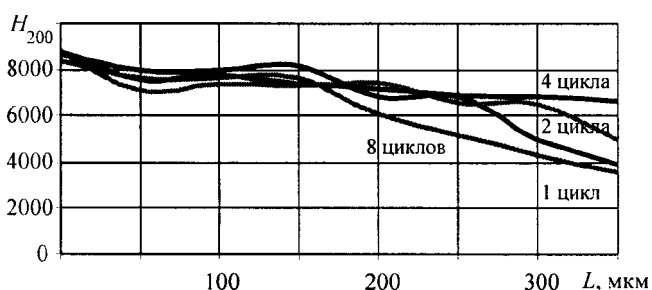


Рис. 2. Распределение микротвердости (МПа) после ЭХТО с циклическим индукционным нагревом (сталь 20)

Диффузия по движущимся границам зерен протекает быстрее, чем по неподвижным [3]. При деформации возрастает плотность дислокаций и вакансий в объеме зерен и взаимодействие мигрирующих границ с дефектами приводит к увеличению свободного объема границ, что обуславливает сильное увеличение коэффициента зернограницной диффузии D_{gr} [4]. При высоких температурах, когда роль объемной диффузии существенна, движущиеся границы с высоким D_{gr} играют роль источников, из которых атомы углерода и азота диффундируют в объем зерен.

ЭХТО совместно с циклическим нагревом привело к повышению микротвердости в диффузионном слое и сердцевине образцов (рис. 2). Повышение обусловлено тем, что при нитроцементации из паст с последующей закалкой в слое сохраняется большое количество остаточного аустенита. Но в процессе многократной фазовой перекристаллизации при ТЦО в высокоуглеродистом аустените протекают процессы перераспределения углерода и выделения цементита, что вызывает обеднение аустенита углеродом.

В результате аустенит становится менее устойчивым и превращается в перлит. При повторном нагреве выделившиеся частицы цементита практически не растворяются при максимальной температуре, так как скорость нагрева высока и времени для их растворения недостаточно, а образовавшийся из высокоуглеродистого аустенита перлит превращается в менее легированный углеродом аустенит. При повторном охлаждении до нижней температуры цикла доля остаточного аустенита с каждым циклом уменьшается.

Подобное явление наблюдается при ТЦО образцов из стали 65Г, которые были предварительно подвергнуты нитроцементации при температуре 850 °С в течение 7 ч. Режим циклической обработки с индукционным нагревом этой стали был выбран с полной фазовой перекристаллизацией и заключался в нагреве выше точки A_3 на 50...80 °С и охлаждении ниже точки A_1 на 50 °С. Выбранный диапазон температур позволил получить равномерный нагрев всего сечения образца за один цикл нагрева. При температуре выше точки Кюри возрастает глубина проникновения тока в металл от 6,5 до 0,7 мм [5] в зависимости от частоты генератора 8...400 кГц.

Равномерности прогрева сечения образца дополнительно способствует интенсивный теплоотвод с поверхности в сердцевину, что приводит к формированию мелкозернистого аустенита по всему сечению образца. Немаловажным фактором в процессе упрочнения образцов по предложенной схеме является то, что в процессе ТЦО с полной фазовой перекристаллизацией не происходит изменения положений критических точек стали [1]. Следовательно, будут исключены перегрев и недогрев стали при осуществлении закалки в последнем цикле обработки.

Упрочнение оборотных долот заключалось в нитроцементации с последующей ТЦО. Исходная микроструктура образцов перед ТЦО представляла собой

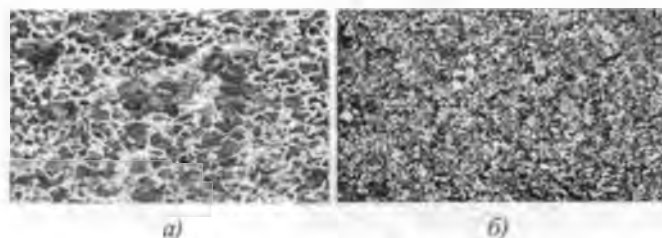


Рис. 3. Микроструктуры сердцевинки образца из стали 65Г ($\times 100$):
а – после ХТО; б – после нормализации

крупнозернистый перлит, окруженный ферритом (рис. 3), диаметр зерна при этом находился в пределах 0,055...0,039 мм.

После циклического нагрева и ТО происходит значительное измельчение структуры закаленных образцов. Размер мартенситных игл за четыре цикла уменьшается с 18 до 8 мкм в сердцевине, а на поверхности – с 12 до 4 мкм, такое измельчение связано с увеличением числа циклов (рис. 4). Более мелкоигльчатый мартенсит в диффузионном слое формируется благодаря тому, что в структуре слоя присутствует цементит вторичный и цементит перлита.

Установлено, что ТЦО способствует измельчению и дроблению карбидных включений, что приводит к увеличению числа зародышей аустенита при нагреве [6]. Благодаря высокой скорости индукционного нагрева, карбиды не успевают раствориться полностью, обеспечивая сохранение мелкого аустенитного зерна.

Сформированная мелкозернистая структура мартенсита отпуска позволила добиться улучшения механических свойств стали 65Г, в частности ударной вязкости, значение которой удалось повысить с 10 до 20 Дж/см² за два цикла нагрева и охлаждения. Излом образца имеет матовый серый цвет с вытянутыми волокнами, что характерно для вязкого излома (рис. 5).

Таким образом, благодаря циклическому нагреву при высокотемпературном диффузионном насыщении, удалось добиться увеличения глубины диффузионного слоя на 17 % относительно изотермического насыщения при равной продолжительности процесса. При ТЦО

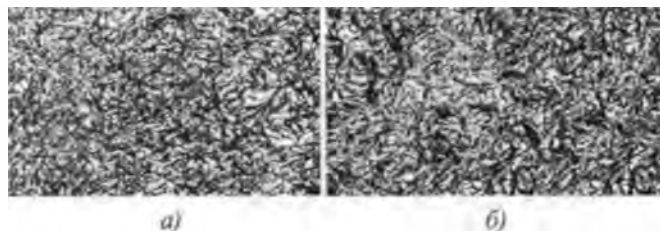


Рис. 4. Микроструктуры диффузионного слоя образцов из стали 65Г после ТО ($\times 1000$):
а – закалка после нормализации; б – закалка после двух циклов



Рис. 5. Разрушения образца из стали 65Г с микроструктурой мартенсита отпуска после испытания на ударную вязкость

происходит значительное измельчение микроструктуры в диффузионном слое и в сердцевине образца. Термоциклирование после ХТО исправляет перегретую микроструктуру образцов в слое и в сердцевине металла, что способствует увеличению ударной вязкости, твердости.

По разработанным способам упрочнения была изготовлена опытная партия деталей, в которую входили крепежные элементы и оборотные долота. Задача испытаний заключалась в проверке эффективности повышения эксплуатационных характеристик готового изделия за счет применения мелкодисперсных структур, сформированных согласно разработанной схеме зонального упрочнения деталей корпусов плугов.

Испытания экспериментальной партии проводили на Белорусской машиноиспытательной станции в 2009 г. Базой для определения эффективности упрочнения служили детали серийного производства РУП "Минский завод шестрен" ("МЗШ") и фирмы "Kverneland". Конструкция и размеры деталей были одинаковыми, отличия заключались в механических свойствах (таблица).

В ходе испытаний проводили оценку показателей надежности упрочненных деталей на базе сельхозпредприятий Минского района на вспашке стерни и многолетних трав на торфяно-глеевых почвах влажностью 47...45 % и средних суглинистых влажностью 18...23 %. Засоренность почвы камнями со средним диаметром 65 мм составила 0,6...1,4 шт./м². Условия проведения испытаний в целом соответствовали требованиям СТБ 1388–2003.

Параметры деталей

Оборотное долото	Материал	Микроструктура лезвийной части	Твердость лезвийной части, HRC	Площадь, обработанная одним долотом, га
РУП "МЗШ"	65Г	Троостит	45...50	17
Упрочненное РУП "МЗШ"		Легированный мартенсит	62...64	25
Kverneland	40ГР	Мартенсит	50...55	

Интенсивность изнашивания оборотных долот и крепежных элементов определяли изменением линейных размеров за количество пройденных гектар. В ходе полевых испытаний наработка на одно долото составила от 17 до 25 га, а на болт — 8...13 га. Анализ значений линейных размеров, являющихся выбраковочными признаками, показал, что износ упрочненных деталей происходит медленнее серийно выпускаемых в 1,4...1,8 раза согласно протоколу БелМИС № 18 Д8/1—2009 от 23 февраля 2009 г.

Таким образом, результаты исследований и полевых испытаний позволили предложить технологии упрочнения деталей и внедрить на РУП "МЗШ" с экономическим эффектом от внедрения более 42 млн руб. (Беларусь).

Выводы

1. Предложен оригинальный способ упрочнения крепежных элементов локальной ЭХТО из порошков и закалкой с индукционным нагревом, позволяющий получить износостойкие структуры на головке болта, а резьбовую часть оставить мягкой и пластичной, благодаря чему сохраняется класс прочности (заявка на изобретение "Болт" № а 20 091 117 от 23.07.2009).

2. Установлено влияние индукционного циклического нагрева в интервале температур 600...1100 °С на скорость формирования диффузионного слоя при проведении процесса электрохимико-термического насыщения. Во время нестационарного процесса диффузии, за равный промежуток времени, можно получить слой 340 мкм, что на 17 % больше, чем в стационарном режиме. Если увеличивать интенсивность теплосмен и уменьшать время выдержки в аустенитной области, то происходит замедление формирования слоя. В этом случае кинетика приближалась к стационарному режиму: 25 мкм слоя за один цикл в течение 15 с выдержки.

3. Разработанная схема распределения микроструктур оборотного долота и примененная технология уп-

рочнения позволили создать деталь, состоящую из зон, для которых характерна определенная структура, обеспечивающая высокую твердость и износостойкость лезвийной части (легированный мартенсит), прочность и долговечность крепежной части (троостит) [7].

4. Полевые испытания на Белорусской машиноиспытательной станции показали, что благодаря упрочнению деталей выпускаемых "МЗШ", их износостойкость сравнялась с западными образцами "Kverneland". Установлено, что износостойкость упрочненных деталей выше серийно выпускаемых деталей в 1,5–1,8 раза в зависимости от типа почвы. Разработанные технологии упрочнения крепежных элементов внедрены на РУП "МЗШ". Экономический эффект от освоения и внедрения составил 42 млн руб. (Беларусь).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ткаченко Г.А., Константинов В.М. Электрохимико-термическая обработка крепежных элементов почвообрабатывающих машин // *Металлургия: Республ. Межведом: сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2008. Вып. 31. С. 358–371.*
2. *Справочник по термомеханической и термоциклической обработке металлов / М.Е. Смагоринский. СПб., 1992. 392 с.*
3. *Диффузия по границам зерен и фаз / И. Каур, В. Густ. М.: Машиностроение, 1991. 448 с.*
4. *Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения / В.Н. Чувильдеев. М.: Физматлит, 2004. 304 с.*
5. *Диффузионные процессы в металлах под действием магнитных полей и импульсных деформаций: в 2-х т. Т. 2 / В.Ф. Мазанко, А.В. Покоев, В.М. Миронов и др. М.: Машиностроение, 2006. 323 с.*
6. *Гурьев А.М., Ворошнин Л.Г. / Циклическое тепловое воздействие при термической и химико-термической обработке инструментальных сталей / ФПСМ: АГТУ. 2005. Вып. 3. С. 37–46.*
7. *Пат. 5303. Рабочий орган почвообрабатывающей машины. № и 20 080 810; 03.11.08.*

