



Improvement of mechanical characteristics of details of the soil-cultivating car. Structurization at cyclic heating of steels. The reasons of an intensification of diffusion at cyclic heating. Structure crushing, impact strength and hardness increase.

Г. А. ТКАЧЕНКО, БНТУ

УДК 621.74:669:714

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ДОЭВТЕКТОИДНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ НИТРОЦЕМЕНТАЦИИ С ЛОКАЛЬНЫМ ИНДУКЦИОННЫМ ЦИКЛИЧЕСКИМ НАГРЕВОМ

Почворежущие детали корпусов плугов относятся к быстроизнашивающимся сменным элементам. Они являются изделиями массового потребления. 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 1,5–2,0 раза и, как правило, не дотягивает до требований СТБ 1388-2003, где для долота оборотного ресурс должен составлять не менее 20 га. Выпускаемые детали имеют низкие значения 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, которая состоит из объемной закалки и среднего отпуска. При этом формируется структура троостита отпуска с твердостью в пределах 45–50 HRC. Крепежные элементы плуга изготавливают, используя стали 20 и 40Х. Болты (сталь 20) получают холодной высадкой без дополнительной термической обра-

ботки, получая изделие со структурой феррита и перлита, которая обеспечивает твердость около 20 HRC и предел прочности 600 МПа. Болты из стали 40Х изготавливают горячей высадкой с последующей термической обработкой, 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 воздействию 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 сопрягаемые поверхности долота и крепежного элемента находились на одном уровне механических свойств, т. е. твердость головки болта была равной или больше твердости долота. Это требуется, чтобы исключить эффект «вымывания» из посадочного отверстия металла болта.

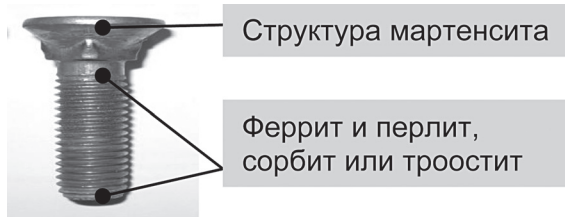


Рис. 1. Требуемое распределение структур по сечению упрочненного крепежного элемента

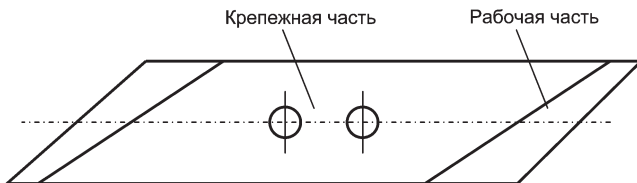


Рис. 2. Зоны упрочнения оборотного долота

Крепежный элемент представляет собой стержень с внешней резьбой на одном конце и головкой на другом с однородной микроструктурой по сечению.

Наиболее тяжелонагруженной 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 (рис. 1).

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, который имеет рабочую часть в виде лезвий с двух сторон и центральную часть, где размещены крепежные отверстия (рис. 2). 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. 3). Исходя из нагрузок и условий

работы, на данной детали требуется получить следующие структуры: износостойкую, например мартенсит, на режущей части и пластичную, типа троостита на крепежной.

Для реализации схемы локального распределения микроструктур по сечению изделий необходимо использовать такую термическую обработку, чтобы нагрев оказывал влияние на структурные превращения лишь на определенных участках детали. К такому виду упрочнения можно отнести электрохимико-термическую обработку, 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 термическую обработку 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 с микротвердостью 9000 МПа.

Увеличение температуры насыщения от 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 12000 МПа. Такой же эффект от увеличения температуры насыщения наблюдается и на стали 20, где, помимо нитроцементованного слоя, образуется ледебурит толщиной 30–40 мкм [1] (рис. 4).

Структуры, сформированные в диффузионном слое при частичном оплавлении поверхности, не приемлемы для использования в качестве за-



Рис. 3. Излом оборотного долота по концентраторам напряжений

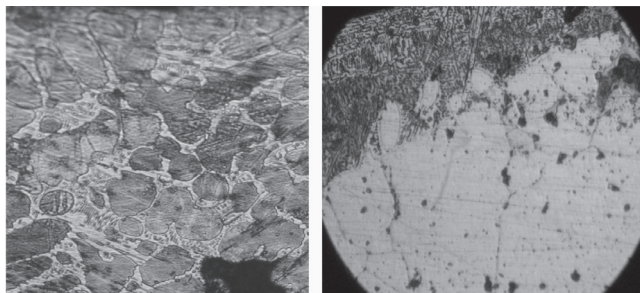


Рис. 4. Структура диффузионного слоя после ЭХТО в режиме оплавления поверхности: а – сталь 40Х; б – сталь 20. $\times 500$

щитных 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 чего 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 количества циклов за единицу времени. Было установлено, что за один цикл, равный 2 мин, толщина высокоуглеродистого слоя составляет 280 мкм, за четыре цикла – 340 мкм, помимо интенсификации процесса, наблюдается и значительное проникновение углерода вглубь основного металла и, как показал металлографический

анализ, в сердцевине образцов при четырехкратном ТЦО феррит практически отсутствует. При увеличении частоты смены температурного режима до восьми скорость роста слоя снижается и толщина составляет всего 180 мкм. Это можно объяснить тем, что при восьми циклах 15-секундной выдержки в высокотемпературной зоне при каждом цикле не достаточно для интенсивной диффузии углерода и азота вглубь материала.

Интенсификация процесса насыщения и формирование мелкозернистой структуры при ТЦО обусловлены следующими физическими причинами. При многократной смене температуры происходит микродеформация зерен из-за структурных и термических напряжений, в результате чего происходит фазовый наклеп металла, который сопровождается рекристаллизацией [2]. 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 привела к повышению микротвердости в диффузионном слое и сердцевине образцов (рис. 5). 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

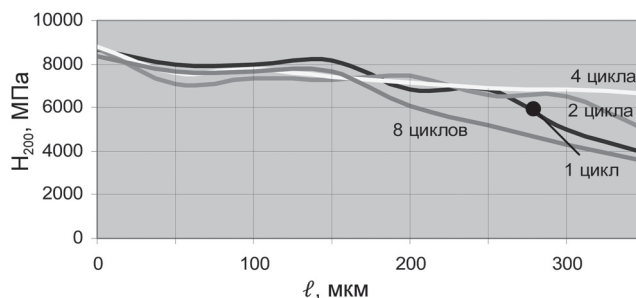


Рис. 5. Распределение микротвердости образцов стали 20 после ЭХТО с циклическим нагревом и закалкой с последующим нагревом

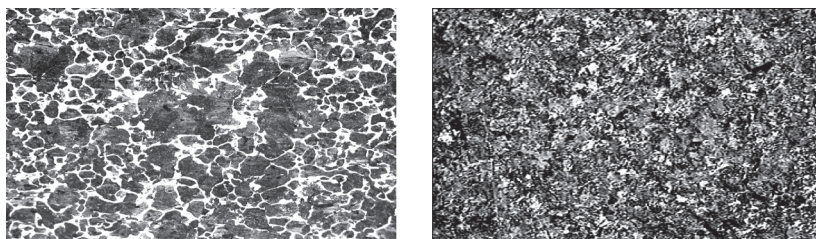


Рис. 6. Микроструктура сердцевины образца стали 65Г: а – после ХТО; б – после нормализации. $\times 100$

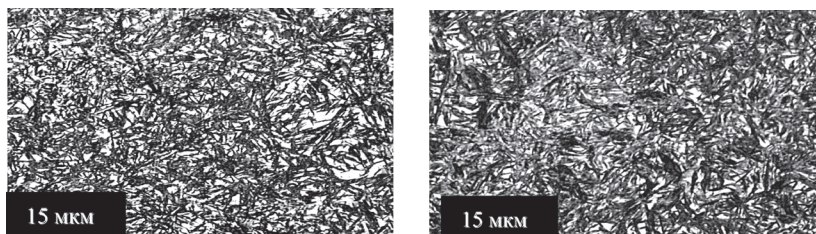


Рис. 7. Микроструктура диффузионного слоя образцов стали 65Г после термической обработки: а – закалка после нормализации; б – закалка после двух циклов. $\times 1000$

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 уменьшается и так далее с каждым циклом.

Подобное явление наблюдается при термоциклической обработке 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 охлаждением ниже 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 6,5–0,7 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]. Это весьма важно для осуществления закалки с последнего цикла нагрева, так как позволяет исключить перегрев стали и отсутствие феррита в закаленной структуре.

Упрочнение оборотных долот заключалось в нитроцементации с последующей циклической термической обработкой. Исходная микроструктура образцов перед ТЦО представляла собой крупнозернистый перлит, окруженный ферритом (рис. 6), диаметр зерна при этом находился в пределах 0,055–0,039 мм.

После циклического нагрева и термической обработки 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. 7). Более мелкоигльчатый мартенсит в диффузионном слое формируется благодаря тому, что в структуре слоя присутствуют цементит вторичный и цементит перлита.

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

С измельчением структуры образцов при ТЦО происходит увеличение твердости, также замечено, что циклический нагрев способствует возобновлению диффузии углерода и азота вглубь металла, что подтверждается характером распределения твердости по сечению (рис. 8). Повышение микротвердости диффузионного слоя и сердцевины образцов стали 65Г связано с уменьшением количества остаточного аустенита за счет его распада при термоциклической обработке.

Сформированная мелкозернистая структура мартенсита отпуска позволила добиться улучше-

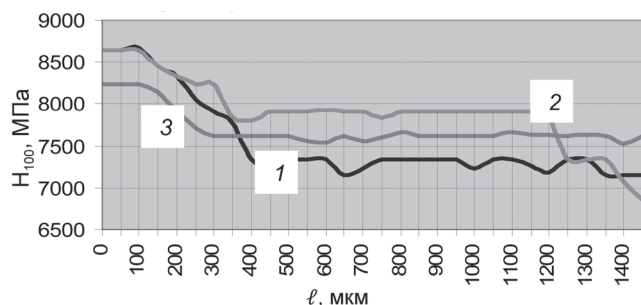


Рис. 8. Распределение микротвердости по сечению образца стали 65Г после нитроцементации с последующим ТЦО и ТО: 1 — закалка и н. о.; 2 — два цикла, закалка и н. о.; 3 — четыре цикла, закалка и н. о.

ния механических свойств стали 65Г, в частности ударной вязкости, значение которой удалось повысить с 10 до 20 Дж/см² за четыре цикла нагрева и охлаждения. Излом образца имеет матовый серый цвет с вытянутыми волокнами, что характерно для вязкого излома (рис. 9).

Таким образом, благодаря циклическому нагреву при высокотемпературном диффузионном насыщении удалось добиться увеличения глубины диффузионного слоя на 30% относительно изотермического насыщения при равной продолжительности процесса. При ТЦО происходит значительное измельчение микроструктуры в диффузионном слое и сердцевине образца. Термоциклирование после химико-термической обработки исправляет перегретую микроструктуру образцов в слое и сердцевине металла, что способствует увеличению ударной вязкости и 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 2008 г. Базой для определения эффективности упрочнения служили детали серийного производства РУП «МЗШ» и фирмы «Kverneland». Конструкция и геометрические размеры деталей были одинаковыми, отличия заключались в механических свойствах (см. таблицу).

Параметры деталей

Оборотное долото	Материал	Микроструктура лезвийной части	Твердость лезвийной части HRC	Обработанная площадь одним долотом, га
РУП «МЗШ»	65Г	Троостит	45–50	17
Упрочненное РУП «МЗШ»	65Г	Легированный мартенсит	60–63	25
«Kverneland»	40ГР	Мартенсит	50–55	25

В ходе испытаний проводили оценку показателей надежности упрочненных деталей на базе СПК «Валевачи», СПК «Запольский», МРСУП совхоз «Волма» и СПК «Петровичи» на вспашке стерни и многолетних трав на торфяно-глеевых почвах влажностью 47–45% и средних суглинках 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.

Интенсивность изнашивания оборотных долот и крепежных элементов определяли изменением линейных размеров за количество пройденных гектаров. 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 раз 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 Минском заводе шестерен с экономическим эффектом от внедрения более 42 млн. руб.

Работа была выполнена в рамках задания 1.49 «Разработать и освоить комплекс технологий, повышения долговечности корпусов плугов отечественного производства» Государственной научно-технической программы «Технология и оборудование машиностроения», подпрограмма «Технология машиностроения».

Выводы

1. Предложен оригинальный способ упрочнения крепежных элементов, локальной ЭХТО из порошков и закалка с индукционным нагревом, позволяющий получить износостойкие структуры на головке болта, а резьбовую часть оставить мягкой и пластичной, благодаря чему сохраняется

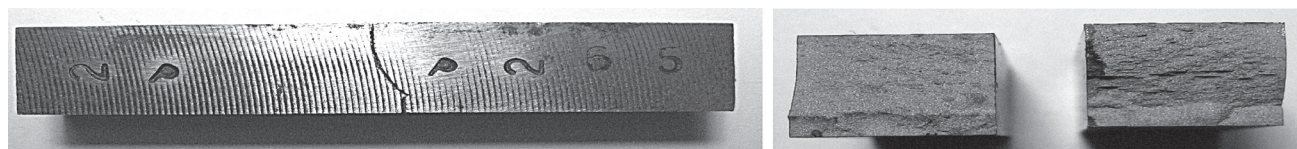


Рис. 9. Разрушение образца стали 65Г с микроструктурой мартенсита отпуса после испытания на ударную вязкость

класс прочности (Заявка на изобретение «Болт» № а20091117 от 23.07.2009 г.).

2. Установлено, что ЭХТО с циклическим нагревом позволяет увеличить глубину диффузионного слоя на 30% относительно изотермического за равное время процесса. Циклический нагрев после химико-термической обработки позволяет исправить перегретую микроструктуру сердцевины и поверхности образца на мелкозернистую, благодаря чему происходит увеличение ударной вязкости.

3. Разработанная схема распределения микроструктур оборотного долота и примененная технология упрочнения 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 (Пат. № 5303 на полезную модель «Рабочий орган почвообрабатывающей машины» № u20080810 от 2008.11.03).

4. Полевые испытания на Белорусской машиноиспытательной станции показали, что благодаря упрочнению деталей, выпускаемых Минским заводом шестерен, их износостойкость сравнялась с западными образцами «Kverneland». Установлено, что износостойкость упрочненных деталей выше серийновыпускаемых деталей в 1,5–1,8 раз в зависимости от типа почвы. Разработанные технологии упрочнения крепежных элементов внедрены на РУП «МЗШ». Экономический эффект от освоения и внедрения составил 42 млн. руб.

Литература

1. Ткаченко Г. А., Константинов В. М. Электрохимико-термическая обработка крепежных элементов почвообрабатывающих машин // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* Мн.: БНТУ, 2008. Вып. 31. С. 358–371.
2. Федюкин В. К. Метод термоциклической обработки металлических материалов. Л.: Знание, 1979.
3. Каур И., Густ В. Диффузия по границам зерен и фаз. М.: Машиностроение, 1991.
4. Чувильдеев В. Н. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения. М.: Физматлит, 2004.
5. Кидин И. Н. Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов. М.: Metallurgy, 1969.
6. Гурьев А. М., Ворошнин Л. Г. Циклическое тепловое воздействие при термической и химико-термической обработке инструментальных сталей // *ФПСМ.* 2005. Вып. 3. С. 37–46.