

В. М. Константинов¹, Г. А. Ткаченко²

¹ *Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: materialovedenie@tut.by*

² *Белорусский государственный университет
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: hleb_tkachenko@mail.ru*

ВЫСОКОПРОЧНЫЙ КРЕПЕЖ ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ

Аннотация. В статье рассматривается проблемы преждевременного износа головок крепежных элементов, фиксирующих быстроизнашиваемые элементы почвообрабатывающих машин.

Задача работы заключалась в получении согласованного ресурса эксплуатации болта и закрепляемого им изделия. Достижение поставленной задачи достигнуто применением разработанной технологии локального повышения прочности и износостойкости крепежного элемента.

Ключевые слова: согласованный ресурс эксплуатации деталей и крепежных элемента, износостойкость, класс прочности крепежного элемента.

V. M. Konstantinov¹, H. A. Tkachenko²

¹ *Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: materialovedenie@tut.by*

² *Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: hleb_tkachenko@mail.ru*

HIGH-STRENGTH FASTENERS FOR WORK IN CONDITIONS OF ABRASIVE WEAR

Abstract. The article deals with the problems of premature wear of the heads of fasteners fixing the wearable elements of tillage machines.

The task of the work was to obtain an agreed service life of the bolt and the product fixed by it. The achievement of this task was achieved by using the developed technology of local increase in strength and wear resistance of the fastener.

Keywords: consistent service life of parts and fasteners, wear resistance, strength class of the fastener.

Введение

В крепежном элементе плужного лемеха или долота наиболее тяжело нагруженной является его резьбовая часть в месте соединения с головкой: она испытывает крутящий момент, образующийся во время навинчивания гайки, и растягивающие напряжения при взаимодействии детали с внешней средой. В зависимости от условий эксплуатации головка болта может подвергаться воздействию абразивных частиц. Следовательно, для надежной и стабильной работы в паре «деталь – болт» недостаточно высокой прочности изделия. Крепежный болт имеет класс прочности от 6.8 до 12.9 в зависимости от используемой стали. В настоящее время для изготовления крепежных изделий наиболее часто используют углеродистые стали (0,1–0,5 % масс. С) по ГОСТ ISO 898-1-2014 (далее – стандарт).

Все крепежные элементы подразделены на двенадцать классов прочности. Класс прочности готового изделия определяется маркой стали, способом изготовления и последующей термической обработкой, которая формирует микроструктуру крепежного элемента и, как следствие,

механические свойства готового изделия. Дополнительно в понятие класс прочности входят механические характеристики – относительное удлинение, предел текучести, твердость. Наиболее распространенными являются крепежные элементы с классами прочности 5.6, 5.8, 6.6, 6.8, а также высокопрочный крепеж 8.8–12.9.

Основными материалами для изготовления болтов являются стали марок 20 и 40Х. Изделия получают с помощью холодной и горячей штамповки с дополнительной термической обработкой или без нее. Холодная штамповка позволяет получить изделия с пределом прочности от 400 до 600 МПа и пределом текучести от 240 МПа до 480 МПа. Такую прочность готовому изделию обеспечивает феррито-перлитная структура после пластической деформации, образующаяся по сечению заготовки в процессе обработки ниже температуры рекристаллизации используемых материалов (сталь 20, 40Х). При горячей штамповке получают заготовки с аналогичными механическими характеристиками, но с меньшей поверхностной твердостью. Более прочные крепежные элементы получают при дополнительной термической обработке, которую проводят после штамповки. Применяют закалку с последующим средним или высоким отпуском. При данных видах отпуска формируется микроструктура троостита или сорбита. Данные структуры позволяют получить предел прочности на растяжение 800–1200 МПа, предел текучести от 640 до 1080 МПа, а также твердость поверхности и сердцевины готового изделия от 30 до 40 HRC. Дополнительных требований по износостойкости головки крепежного элемента действующие нормативные документы не предусматривают.

Помимо прочности от крепежных элементов в ряде случаев требуются специальные свойства, которые определяются из условий эксплуатации закрепляемых деталей, например коррозионная стойкость, сопротивление высокотемпературному окислению (жаростойкость), а также износостойкость поверхности головки болта. Первые два условия можно обеспечить, применив соответствующие стали и покрытия.

Повышение износостойкости головки крепежного элемента является более сложной задачей. Требуется получить готовое изделие с высокими значениями твердости и износостойкости поверхности, но при этом не должны быть ухудшены механические свойства стержня (прочность, пластичность, вязкость). Подобные требования характерны, например, для болтов крепления броневых плит в измельчающих механизмах, защитных элементов горнодобывающего оборудования, почвообрабатывающих машинах. В ряде случаев ресурс защитного элемента или рабочего органа почвообрабатывающей машины лимитируется долговечностью крепежа, который разрушается при интенсивном абразивном воздействии окружающей среды.

Тяжелые почвы Беларуси приводят к повышенному износу головки болта, который обусловлен постепенным «вымыванием» почвой мягкого металла крепежного элемента в посадочном отверстии рабочего органа, что приводит к преждевременному нарушению целостности конструкции (рис. 1). В результате этого износа закрепляемая деталь, не достигшая своего предельного ресурса, отрывается от лемеха и теряется в поле (рис. 2).

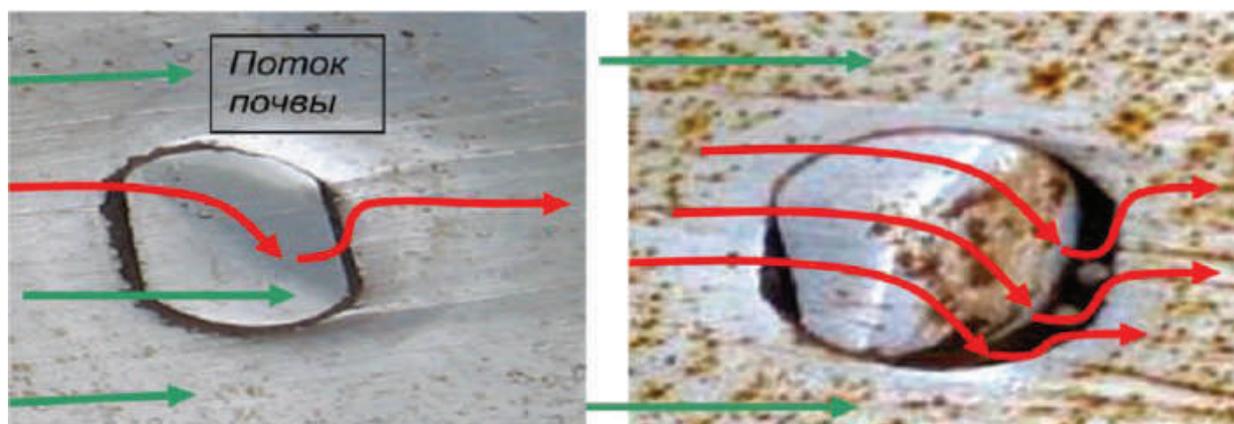


Рис. 1. Эффект «вымывания» почвой головки болта



Рис. 2. Корпус плуга с утраченными долотом и лемехом из-за разрушения шляпок крепежных болтов. Выработка 21 Га. Песчаные почвы

Предельный ресурс работоспособности деталей и крепежных элементов зависит не только от выбранной стали и упрочняющей технологии, но и от вида и плотности почвы, скорости движения плуга (не более 9 км/ч), времени года (уплотнение почвы), потока почвы (ламинарный, турбулентный), свойств защитного покрытия на режущих элементах.

Основная часть

Наиболее тяжело нагруженной частью болта является его резьбовая часть в месте соединения с головкой: она испытывает 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. Поэтому, исходя из условий работы крепежного элемента и нагрузок, целесообразно сохранить исходную микроструктуру на ножке болта, а на головке получить износостойкую структуру, например мартенсита (рис. 3).



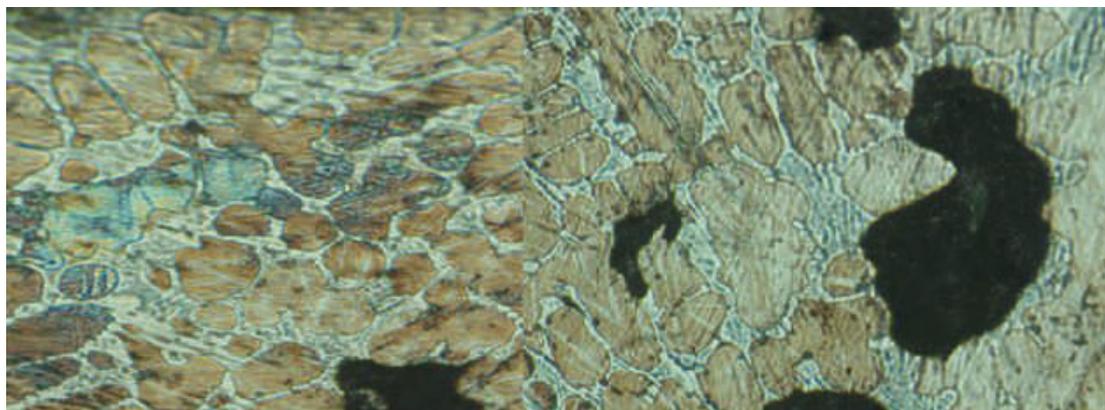
Рис. 3. Требуемое распределение структур по сечению упрочненного крепежного элемента

Чтобы сформировать микроструктуры в соответствии с описанной схемой локального распределения структур, на готовых деталях использована термическая обработка, оказывающая влияние на структурные превращения лишь на определенных участках детали. Были рассмотрены технологии упрочнения: электрохимикотермическая обработка, локальная закалка, отпуск с индукционным нагревом. Способы обработки выбраны в качестве альтернативы традиционным способам повышения твердости и износостойкости стальных изделий: объемной химико-термической и термической обработке.

Каждая технология была теоретически обоснована и экспериментально изучена для использования в качестве способа упрочнения болтов.

Высокотемпературная нитроцементация из паст. Указанный способ позволил за 20–90 секунд получить на образцах (сталь 20, 40Х) диффузионные слои величиной от 0,06 до 0,9 мм. В этом случае после нитроцементации при 1100 °С и последующей закалки формируется диффузионный слой, состоящий из игольчатого мартенсита и остаточного аустенита с твердостью 9000 МПа. Увеличение температуры насыщения с 1100 °С до 1200–1300 °С приводит к образованию на поверх-

ности образца жидкометаллической фазы, что позволяет получить на стали 40X за 90 секунд слой толщиной 0,9 мм, состоящий из крупных зерен перлита, вокруг которых располагаются дендриты с высокой твердостью порядка 12000 МПа. Такой же эффект от увеличения температуры насыщения наблюдается и на стали 20, где помимо нитроцементованного слоя образуется ледебурит величиной 30–40 мкм [1], рис. 4.



×500

Рис. 4. Структура диффузионного слоя после ЭХТО в режиме оплавления поверхности на стали 40X

Структуры, сформированные в диффузионном слое по режиму, который предусматривает оплавление поверхности, приемлемы для использования в качестве защитных покрытий от абразивного воздействия. Однако при высоких температурах наблюдается значительный теплоотвод к холодным частям 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 термической обработки можно применить только для крепежа из стали 20, где резьбовая часть состоит из структур отжига феррита и перлита. Для болтов из стали 40X такой значительный теплоотвод к ножке болта приводит к изменению структуры сорбита на феррит и перлит, в результате этого снижается прочность детали.

Для крепежных элементов из стали 40X, прошедших предварительную термическую обработку, была рассмотрена возможность использования локальной закалки с последующим низким отпуском для снятия термических напряжений. Технологическая операция заключалась в быстром индукционном нагреве до 850 °C и охлаждении в масле и дополнительном низком отпуске при 180 °C в течение 2 часов. Эта технологическая операция проводилась для получения максимальной возможной глубины упрочненного слоя с высоким значением твердости по сечению головки болта.

При обработке требовалось учитывать, что максимальная глубина закаленного слоя с мартенситной структурой не должна располагаться на границе между головкой и резьбовой частью болта, то есть в самом нагруженном месте. Это является нежелательным явлением, снижающим прочность. Глубина упрочненного слоя регламентируется исходя из того, что крепежный болт должен работать с закрепляемой деталью согласованно и до предельного износа детали. Таким образом, равномерное изнашивание с закрепляемой деталью достигалось за счет твердости, сопоставимой с основной деталью.

Для получения требуемой величины упрочненного слоя были подобраны оптимальные параметры индукционного нагрева. Частота генератора влияет на глубину проникновения тока в металл, чем она выше, тем ниже глубина, а мощность установки определяет зону термического влияния, возникающую из-за теплоотвода с поверхности детали. Таким образом, был выбран высокочастотный генератор с большой мощностью, который обеспечил упрочненный слой в 5–8 мм. Выбранные параметры установки позволили получить требуемое распределение твердости по сечению головки и ножке болта (рис. 5).

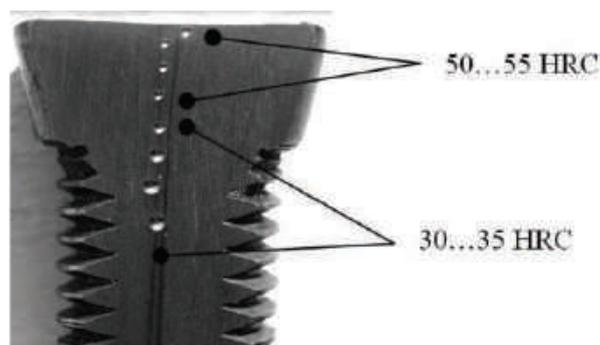


Рис. 5. Распределение твердости по сечению крепежного элемента после локальной закалки с отпуском

После локального упрочнения гомогенная микроструктура болта меняется на макрогетерогенную, следовательно, изменяются механические характеристики. Поэтому упрочненные крепежные элементы были подвергнуты прочностным испытаниям. Согласно требованиям стандарта, крепежный элемент соответствует своему классу прочности, если в ходе испытаний на растяжение произойдет разрушение по стержню болта или на резьбовой части будет наблюдаться срез нескольких витков резьбы, дополнительно определяющими будут параметры относительного удлинения δ в %, предела текучести. Болт считается не прошедшим испытание, если разрушение произошло в месте соединения резьбовой части и головки болта, вне зависимости от приложенной нагрузки. Проведение прочностных испытаний не требует изготовления специальных образцов, так как стандарт допускает определение механических параметров изделия, используя реальные детали. С целью определения класса прочности болтов, которые прошли термическое упрочнение, изготовлено специальное устройство. Это устройство представляло собой набор из двух патронов, в которые закладывались шайбы, имеющие отверстия, профилированные под диаметр резьбы и форму головки болта. Крепежный элемент, закрепленный в двух шайбах, помещался в патрон, после чего положение испытуемого болта фиксировалось крышками, которые закреплялись при помощи четырех болтов М12. Собранное устройство устанавливалось в разрывную машину, растягивающая нагрузка на образец передавалась при помощи двух хвостовиков, расположенных в патронах и в захватах машины (рис. 6).

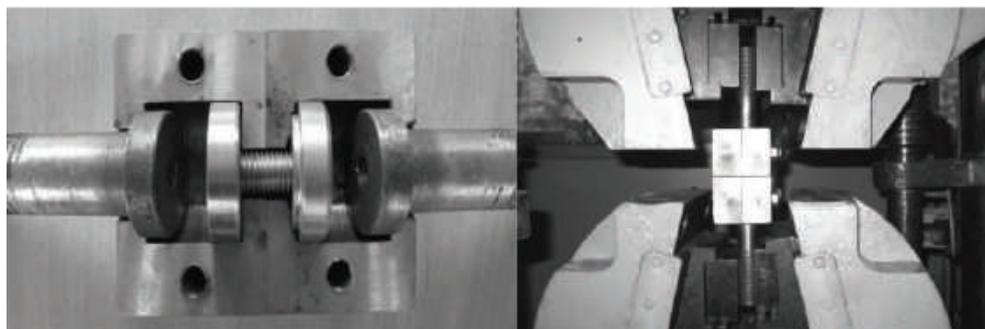


Рис. 6. Оснастка для механических испытаний на разрыв крепежных элементов

Нагрузка подавалась плавно, с постоянной скоростью не более 10 кг/с, чтобы исключить преждевременное разрушение образца, а также с целью получения более точной и четкой кривой растяжения. Испытанию была подвергнута партия болтов в количестве 30 штук по 5 образцов на один вид обработки. Базой для сравнения результатов служили образцы, изготовленные штамповкой с термической обработкой, а также крепеж, полученный холодной штамповкой (параметры представлены в таблице).

Разрушение испытуемых образцов происходило по телу крепежной части болта при нагрузках, соответствующих 6 и 12 классу прочности. Однако болты, выполненные из стали 40Х, имеющие структуру сорбита по сечению, не прошли испытание. С повышением нагрузки происходило

деформирование конусной головки болта, ее сжатие, и в результате на значении 72 кН болт протягивался через шайбу без разрушения. Этот эффект, скорее всего, можно объяснить лишь конусной формой головки болта, которая имеет малую опорную площадь. Упрочненные крепежные элементы достигли максимальной нагрузки до разрушения, которая составила 82 кН, при этом изменения геометрических размеров головки болта не наблюдалось. Относительное удлинение, характеристика пластичности, составило от 16 % на образцах стали 20 и 10,5 % на стали 40X. Полученные значения δ соответствуют табличным параметрам из ГОСТ ISO 898-1-2014 в соответствии с временным сопротивлением (табл. 1).

Таблица 1. Механические параметры упрочненных крепежных элементов

Марки стали	Обработка	Структура по сечению болта		Упрочненный слой, мм	Твердость, HRC	Предел прочности болта σ_b , МПа	Относительное удлинение после разрыва δ , %
		резьбовая часть	головка				
углеродистая (10, 20)	штамповка	феррит и перлит	феррит и перлит	–	20	600	16
углеродистая (10, 20)	штамповка, ЭХТО, поверхностная закалка и при 180 °С отпуск	феррит и перлит	легированный азотом мартенсит	0,1-0,6	60...63	600	16
			мартенсит	min 5	25...30		
углеродистая (10, 20)	штамповка, закалка и отпуск	феррит и перлит	мартенсит, феррит и перлит	min 5	25...30	600	17
легированная (40X)	штамповка, закалка и отпуск	сорбит или троостит	сорбит или троостит	–	30...35	72 кН произошло вытягивание головки болта	0
легированная (40X)	штамповка, закалка и отпуск, поверхностная закалка и отпуск	сорбит или троостит	мартенсит	max 8	50...55	1200	10,5

Испытания болтов, упрочненных при помощи ЭХТО, показали, что при нагрузках 35 кН и 60 кН для сталей 20 и 40X соответственно происходит срез трех-четырех витков резьбы. Разупрочнения на болтах из стали 20 не наблюдалось, а болты из 40X становились менее прочными, это вызвано значительной зоной термического влияния при ЭХТО, в результате чего изменялась микроструктура резьбовой части с троостита на феррито-перлитную смесь, которая имеет меньшее значение сопротивления разрыву (рис. 7).



Рис. 7. Вид разрушения крепежных элементов: а – 1 – болт стандартный из стали 40X; 2 – ЭХТО + термообработка (ТО); 3 – закалка + низкий отпуск (Н.О.); б – 1 – болты стандартные из стали 20; 2 – ЭХТО + ТО; 3 – закалка + Н.О.

Таким образом, стандартные испытания крепежных элементов позволили установить, что изготовление износостойкого крепежа с высокими показателями прочности и пластичности резьбовой части в сочетании с требуемыми трибологическими свойствами технически возможно.

На следующем этапе работы была изучена абразивная износостойкость головок крепежных болтов. Для этого была создана лабораторная установка для испытаний в среде незакрепленного абразива (рис. 8).

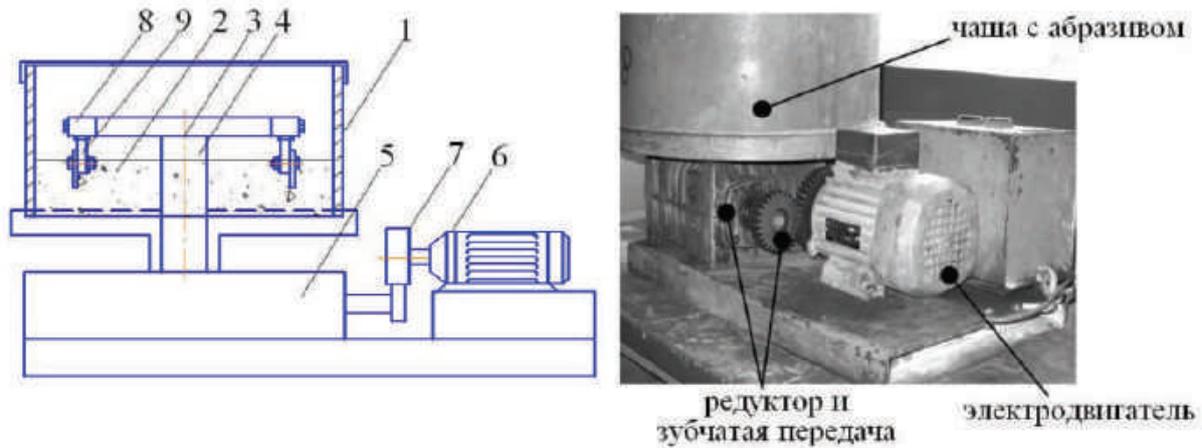


Рис. 8. Установка для испытаний на трение и износ в условиях абразивного воздействия: 1 – чаша; 2 – абразив; 3 – ротор; 4 – вал; 5 – редуктор; 6 – двигатель; 7 – передача; 8 – держатель; 9 – стержень

В установке предложенной конструкции можно изменять угол атаки, применять абразивные среды различного гранулометрического состава, использовать среды с различной влажностью, плотностью и твердостью абразивных частиц для обеспечения более реальной картины износа деталей, работающих в абразивной среде. В ходе лабораторных исследований каждый образец подвергался шестичасовому испытанию в абразивной массе, состоящей из кварцевого песка и карбида кремния на пути трения 17 000 м.

После этапа приработки интенсивность изнашивания испытываемых образцов стабилизировалась. Потеря массы образцами составляет 0,004–0,231 грамм (рис. 9). Очевидно, что закаленные и нитроцементованные слои меньше поддаются износу, чем детали без упрочнения. Упрочненные крепежные элементы изнашивались в 1,6 раза менее интенсивно, чем серийно выпускаемые.

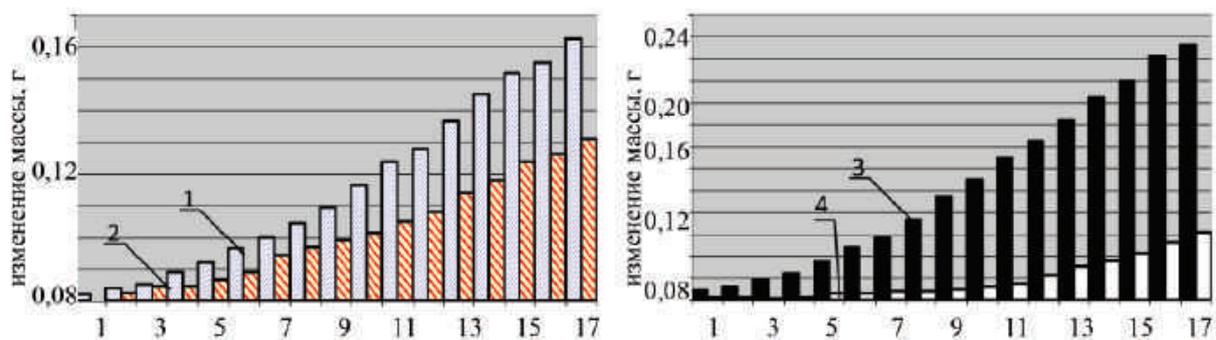


Рис. 9. Гистограмма износа образцов болтов: 1 – улучшение; 2 – закалка; 3 – высадка; 4 – нитроцементация из паст

Таким образом, благодаря локальному упрочнению удалось сформировать на крепежном элементе дисперсные микроструктуры, обеспечивающие требуемые износостойкость и прочность готового изделия. Проведенные испытания в соответствии с ГОСТ ISO 898-1-2014 подтвердили, что упрочненный крепеж соответствует классам прочности 6 и 12. Износостойкость повысилась в 1,6 раз относительно стандартных болтов.

Были проведены полевые испытания упрочненных деталей. Общая наработка составила 405 га. Наибольший эффект [2] повышения долговечности изделий зафиксирован на тяжелых суглинистых и супесчаных почвах, оказывающих сильное абразивное воздействие (табл. 2).

Таблица 2. Результаты полевых испытаний болтов для крепежа деталей корпусов плугов

Плуг	Средний износ, мм		Относительное повышение ресурса упрочненной детали
	длина	толщина	
Болт для крепежа долот			
ППН.8.30/50 – 308	4,4	–	–
ППН.8.30/50 – 308 У	2,6	–	1,7–1,26
Болт для крепежа груди отвала			
ППН.8.30/50 – 306	0,7	–	–
ППН.8.30/50 – 306 У	0,4	–	1,75
Болт для крепежа полевой доски			
ППН.8.30/50 – 307	0,1	–	–
ППН.8.30/50 – 307 У	0,05	–	2,0

Заключение

Предложен оригинальный способ получения высокопрочного крепежа, способного работать в условиях абразивного изнашивания. Испытания в соответствии с ГОСТ ISO 898-1-2014 показали, что благодаря локальному упрочнению крепеж имеет механические характеристики, соответствующие классам прочности 6 и 12. Разработана специальная оригинальная установка для испытания на трение и износ в условиях интенсивного абразивного воздействия. Установка позволяет максимально приблизить лабораторные испытания к реальным условиям эксплуатации крепежных элементов, работающих в абразивной среде. Износостойкость в среде незакрепленного абразива крепежных элементов после упрочнения возросла в 1,6 раза по сравнению с серийно выпускаемым крепежом.

Полевые испытания на ГУ «БелМИС» показали увеличение ресурса эксплуатации болтов в 1,7–2,0 раза относительно серийно выпускаемых изделий. Износостойкий крепеж обеспечил согласованный ресурс пары «деталь-болт», который лимитировался сроком работы закрепляемой детали.

Список используемых источников

1. Константинов, В. М. Электрохимикотермическая обработка крепежных элементов почвообрабатывающих машин / В. М. Константинов, Г. А. Ткаченко, И. С. Сушко // Металлургия : республ. межведом. сб. науч. тр. / Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2008. – Вып. 31. – С. 358–371.

2. Константинов, В. М. Комплексное обеспечение долговечности корпуса почвообрабатывающего плуга поверхностным и объемным упрочнением быстроизнашиваемых деталей / В. М. Константинов, Г. А. Ткаченко, В. Г. Щербатов // Перспективные материалы и технологии : монография : в 2 т. / Национальная академия наук Беларуси (Минск) ; под ред. В. В. Клубовича. – Витебск : ВГТУ, 2017. – Т. 2, гл. 17. – С. 324–341.