

УДК 621. 833

П. Н. Богданович¹, М. И. Михайлов², К. М. Михайлов²

¹ Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Кирова, 34, 246000 Гомель, Республика Беларусь

² Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Министерство образования Республики Беларусь, пр. Октября, 48, 246746 Гомель, Республика Беларусь, +375 (232) 47 91 61, Mihailov@gstu.by

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОФРИКЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ НОЖЕЙ РЕЖУЩЕГО БАРАБАНА КОРМОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА НА ИХ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

Рассмотрена эффективность использования высокопрочного чугуна в конструкциях ножей режущего барабана кормоуборочных комбайнов. Приведены схемы установок для упрочнения и исследования износостойкости. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния электрофрикционного упрочнения ножей режущего барабана кормоуборочного комбайна на их износостойкость. Установлено, что износостойкость ножей повышается в 1,2...1,5 раза.

Ключевые слова: кормоуборочный комбайн; ножи режущего барабана; электрофрикционное упрочнение.

Табл. 4. Рис. 8. Библиогр.: 15 назв.

P. N. Bogdanovich¹, M. I. Mikhailov², K. M. Mikhailov²

¹ Institution of Education "Belarusian State University of Transport" Ministry of Education of the Republic of Belarus, 34, Kirova str., 246000 Gomel, the Republic of Belarus

² Institution of education "Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi" Ministry of Education of the Republic of Belarus, 48, October ave., 246746 Gomel, the Republic of Belarus, +375 (232) 47 91 61, Mihailov@gstu.by

RESEARCH OF INFLUENCE OF ELECTROFRICTION HARDENING OF FORAGE HARVESTER CUTTING DRUM KNIVES ON THEIR WEAR RESISTANCE

Efficiency of use of high-duty cast iron in constructions of forage harvester cutting drum knives is considered. Installation schemes for hardening and durability studies are suggested. The results of experimental studies of the influence of electrofriction hardening of forage harvester cutting drum knives on their durability are considered. It is found that durability of knives increases 1.2...1.5 times.

Key words: forage harvester; knives; cutter drum; electrofriction hardening.

Table 4. Fig. 8. Ref.: 15 titles.

Введение. На современном этапе развития сельскохозяйственного машиностроения стоит задача разработки и выпуска машин, позволяющих обеспечить максимальное сбережение сырьевых, топливных и энергетических ресурсов на всех этапах производства, переработки и использования сельскохозяйственной продукции [1].

В условиях современного производства растёт производительность, экономичность и надёжность сельскохозяйственной техники, снижается её масса на единицу мощности, повышается точность изготовления изделий. Современные машиностроительные предприятия выпускают изделия с высокими эксплуатационными качествами при минимальных трудозатратах общественного труда. Большое влияние на безотказность технического устройства оказывают условия его работы, а именно воздействующие как на него, так и на составляющие элементы механические, климатические нагрузки и т. д. При проектировании устройства необходимо максимально уменьшить влияние внешних и внутренних нагрузок на его элементы [2].

Процесс измельчения растительной массы проходит при высоких окружных скоростях и является самым энергоёмким во всём технологическом процессе работы комбайна. Наиболее нагруженными, подверженными интенсивному изнашиванию являются ножи измельчающего барабана. Качество измельчённой массы может характеризоваться длиной резки и степенью измельчения, т. е. объёмной величиной частиц [3].

Перемещаемая питающими вальцами растительная масса движется на противорежущую пластину со скоростью, вычисляемой по формуле

$$V_n = \eta \pi D_n / 60,$$

где η — коэффициент пробуксовывания стеблей, равный 0,85...0,9;

D_n — диаметр одного из питательных вальцов, м.

Длина частиц определяется по выражению

$$l_{\text{расч}} = V_n \cdot 60 / (nZ),$$

где n — частота вращения барабана;

Z — число ножей.

Загрязнённость и засорённость убранной массы почвой, остатками органических и минеральных удобрений или гербицидов, а также частицами раздробленных инородных предметов являются сопутствующими факторами работы измельчающего аппарата.

При резании толстого слоя усилие затрачивается не только на разрушение материала, но и на преодоление трения между фасками лезвия и материалом. При этом сила возникающего трения между фасками и материалом пропорциональна площади контакта этих фасок с материалом. С увеличением угла скольжения τ площадь контакта F увеличивается:

$$F = \frac{F_0}{\cos \tau},$$

где F_0 — площадь контакта при τ , равном 0.

Согласно исследованиям Н. Е. Резника, чем тоньше слой, тем меньше удельная работа, необходимая для его перерезания, и, следовательно, рациональнее процесс резания [4].

В рамках мероприятий по импортозамещению и внедрению в производство новых материалов создан высокопрочный чугун с шаровидным графитом марки ВЧТГ (патент № 15617) с особым химическим составом (таблица 1). Основные свойства данного материала, регулируемые термообработкой, находятся в следующих пределах: твёрдость до 55 HRC; предел прочности при растяжении ~ 900...1 400 МПа; относительное удлинение при разрыве ~ 1,5...3,5%. Главной особенностью чугуна марки ВЧТГ является то, что его характеристики сопротивления усталости практически достигают таковых для высокопрочной легированной стали. Поэтому в качестве материала для ножей измельчающего барабана используют высокопрочный чугун ВЧТГ, который по основным прочностным характеристикам практически не уступает стали. Кроме того, для изготовления ножей использовались сталь 51CrV4 (производства Германии) и сталь 65Г. Рассмотрим химический состав и механические свойства стали 65Г (таблицы 2 и 3).

В условиях СКБ ПО «Гомсельмаш» проведены натурные краш-тесты на дубовых и сосновых досках со стальными стержнями диаметром 20 мм и твёрдостью 40 HRC. При работе чугунных ножей происходило их локальное разрушение. В полевых условиях стойкость ножей составляло 30 000 т, что на 10...20% ниже, чем стальных ножей. Нестабильность условий испытания не позволяет установить относительную износостойкость материалов ножей.

Т а б л и ц а 1. — Химический состав высокопрочного чугуна

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
3,2...3,6	3... 3,8	0,4...0,7	до 0,8	до 0,01	до 0,1	до 0,15	до 0,6

Т а б л и ц а 2. — Химический состав стали 65Г

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,63... 0,67	0,17... 0,37	0,9...1,2	до 0,25	до 0,035	до 0,035	до 0,25	до 0,2

Т а б л и ц а 3. — Механические свойства стали 65Г

σ_B	σ_T	δ_5	Ψ	KCU
МПа	МПа	%	%	кДж/м ²
980	785	8	30	76

Основная часть. Методика проведения испытаний. В качестве способа упрочнения был выбран экспериментальный метод электрофрикционного упрочнения. Приведём его принципиальную схему (рисунок 1). Режимы упрочнения были выбраны следующие значения: сила тока I , равная 200 А, скорость перемещения V — 1 м / мин.

Упрочняемая деталь 1 закрепляется в ванне 3, наполненной рабочей жидкостью (водой) 4 таким образом, чтобы деталь была полностью покрыта жидкостью. На участок детали, подвергающийся упрочнению, опускается вращающийся диск 2, изготовленный из серого чугуна, который имеет возможность совершать продольное перемещение относительно детали. Упрочняемая деталь и чугунный диск замыкаются в электрический контур. При соприкосновении диска с деталью происходит электрический пробой, вследствие чего происходит быстрый нагрев локального участка упрочняемой детали. Так как упрочнение проводится в воде, то происходит быстрое охлаждение, благодаря чему достигается поверхностная закалка детали.

Одновременно на поверхность осуществляется перенос серого чугуна, который отбеливается вследствие воздействия высоких температур. Наличие на поверхности белого чугуна приводит к увеличению триботехнических свойств упрочняемой поверхности.

Испытания образцов на абразивное изнашивание проводились на торцевой машине трения (рисунок 2). В качестве контртела использовалась стальная деталь (поддон 4) в водной взвеси (NaCl и KCl (3 масс. %), SiO₂ (5...10 масс. %)). Данный состав примесей моделировал реальные условия работы ножей (калийная соль — удобрение, песок — естественная среда). Принцип испытания заключался в том, что образец 1, закреплённый в держателе 6, опускался на поддон 4, в котором находилась водная взвесь калийной соли и песка (рабочая жидкость 2). Поддон приводился во вращение от электродвигателя в корпусе 5. Износ происходил путём попадания абразива между поддоном и образцом, а также по причине коррозионных процессов. На край кронштейна 3 навешивался груз 7 из набора разновесов, что позволяло проводить испытания при различных нагрузках.

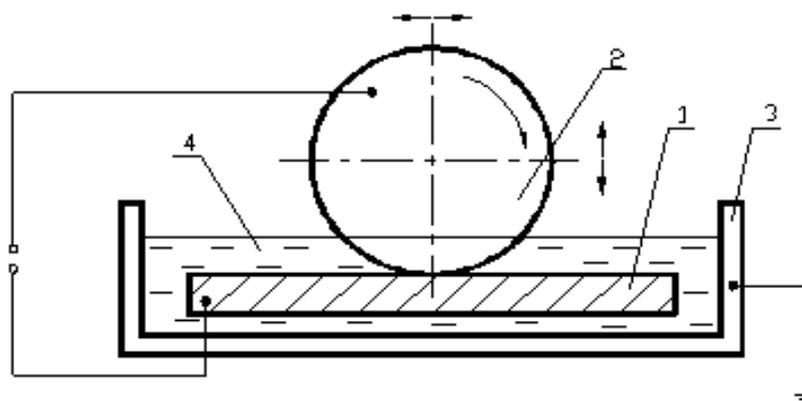


Рисунок 1. — Принципиальная схема электрофрикционного упрочнения

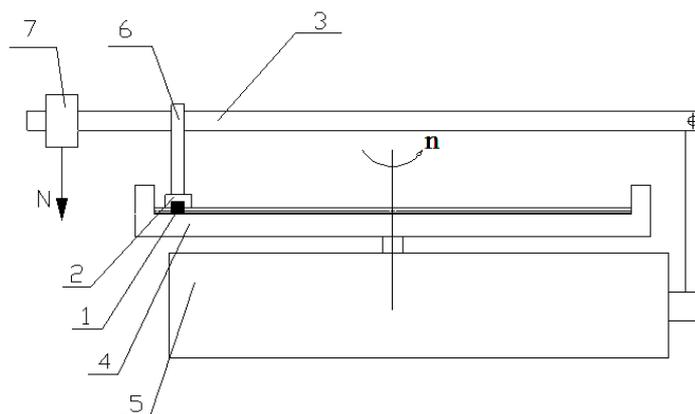


Рисунок 2. — Схема установки трения

Держатель имел возможность перемещаться вдоль кронштейна, что позволяло менять радиус от центра диска до образца и проводить испытания с изменением скорости.

В качестве критерия определения триботехнических свойств была выбрана массовая интенсивность изнашивания. Образцы взвешивались до и после проведения испытаний, и по потере массы можно было определить наиболее износостойкий образец при данных условиях проведения эксперимента. Поддон устанавливался и закреплялся на вращающемся столе, в него наливалась водная взвесь калийной соли и песка. При вращении центробежными силами твёрдые частицы абразива выносило к краям поддона, поэтому для равномерности концентрации абразивных частиц на кронштейне дополнительно закреплялась кисточка, которая непрерывно перемешивала рабочую среду.

В ходе предварительного подбора режимов проведения экспериментов были выбраны следующие основные параметры: грузы весом 0,5; 1,0 и 1,5 кг, скорости вращения поддона 0,28...0,57 м / с, время проведения одного опыта — 15 мин.

По окончании каждого опыта определялись потери массы по формуле

$$\Delta m = m_1 - m_2,$$

где m_1 и m_2 — массы образцов до и после испытания соответственно, кг.

Затем производился расчёт массовой интенсивности изнашивания по формуле

$$I_m = \Delta m / \rho s,$$

где ρ — плотность материала, кг / м³;

s — площадь поверхности трения, м².

Опыты повторялись четыре раза для каждого образца из различных материалов, что повышало достоверность получаемых результатов.

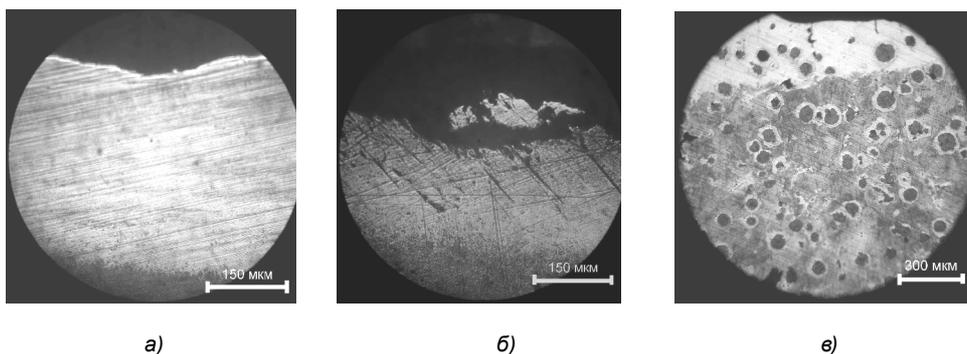
Результаты испытаний. Представлены микроструктуры образцов после упрочнения (рисунок 3).

В нижней части изображения (см. рисунок 3, а) видна неупрочнённая основа стали (тёмный участок). Зона упрочнения составляет 300...350 мкм, однако может достигать 400 мкм, присутствует также зона термического влияния и зона легирования (отбеленный чугун).

В нижней части изображения (см. рисунок 3, б) видна неупрочнённая основа стали. В средней наблюдается зона упрочнения, состоящая из светлого слоя толщиной 150...250 мкм (светлый участок). Видны глобулярные включения графита (тёмные округлые участки), окружённые слоем феррита (светлые участки) в тёмной перлитной матрице (см. рисунок 3, в). В верхней части видна зона упрочнения (светлый участок) с образованием отбеленного чугуна. Видно, что толщина зоны упрочнения достигает примерно 300...400 мкм.

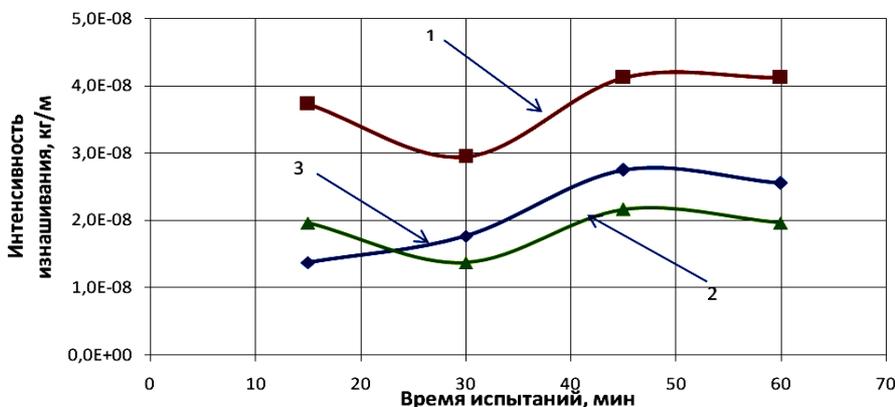
Представлена интенсивность изнашивания упрочнённых образцов при режиме трения № 1 (давление P в зоне контакта, равное 9,1 кПа, и скорость V — 0,57 м / с) во времени (рисунок 4).

Сталь 65Г проявляет наиболее высокую интенсивность изнашивания по сравнению с другими материалами (см. рисунок 4). Это связано с тем, что у неё наименьшая твёрдость и, следовательно, наименьшее сопротивление абразивному изнашиванию. Высокие значения интенсивности изнашивания



а — сталь 51CrV4; б — сталь 65Г; в — чугун ВЧТГ

Рисунок 3. — Микроструктуры образцов после упрочнения



1 — сталь 65Г; 2 — сталь 51CrV4; 3 — чугун ВЧТГ

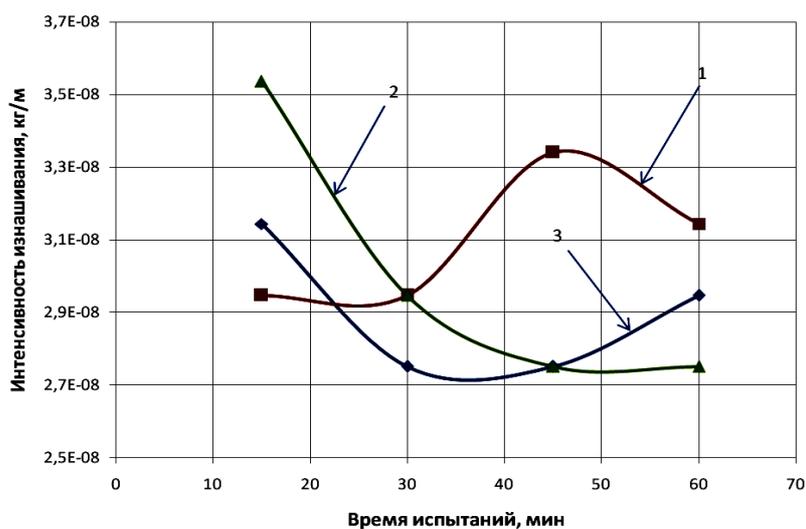
Рисунок 4. — Графики влияния времени испытания на интенсивность изнашивания

у образцов из сталей 65Г и 51CrV4 связаны с высокой шероховатостью образцов после упрочнения и, как следствие, сколом небольших участков острых кромок образцов. Дальнейшее увеличение интенсивности изнашивания у образцов из всех материалов связано с увеличением фактической площади трения. Стабилизация или небольшое снижение интенсивности изнашивания связано с уменьшением размера абразивных частиц. По сравнению с неупрочнёнными упрочнённые образцы на режиме испытаний № 1 (P равно 9,1 кПа, V — 0,57 м / с) обладают значительно более высокой (в 1,5 раза) износостойкостью.

Представлена интенсивность изнашивания упрочнённых образцов при режиме трения № 2 (P равно 18,2 кПа, V — 0,57 м / с) во времени (рисунок 5).

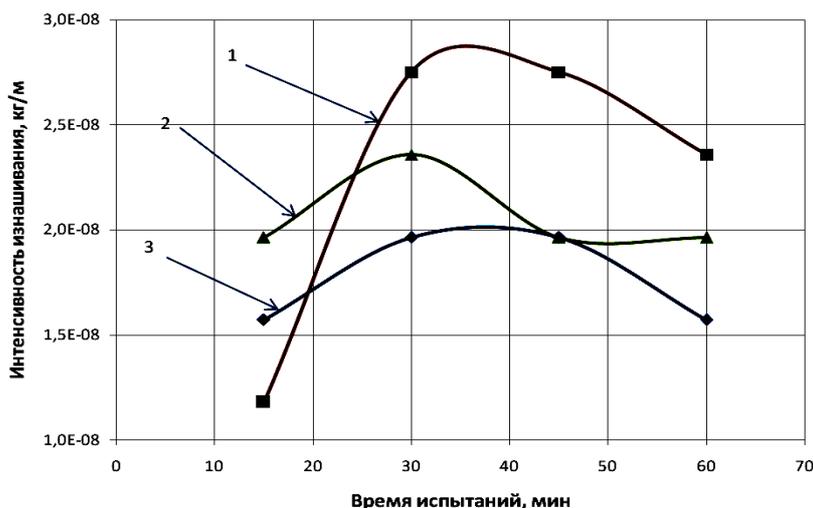
Видно, что высокие начальные значения интенсивности изнашивания (см. рисунок 5) у образцов из стали 51CrV4 и чугуна аналогичным образом объясняются сколом небольших участков острых кромок. Значения интенсивности изнашивания чугуна ВЧТГ и стали 51CrV4 в период времени с 15-й по 60-ю мин относительно стабильны, имеют незначительные отклонения (до $0,2 \cdot 10^{-8}$ кг / м) и могут объясняться как погрешностью измерений, так и совместным увеличением фактической площади трения и уменьшением размера абразивных частиц. Пик интенсивности изнашивания у стали 65Г объясняется однократным сколом хрупкого участка упрочнённой поверхности. По сравнению с неупрочнёнными образцами упрочнённые на этом режиме испытаний также проявляют более высокую износостойкость (в 1,2...1,5 раза).

Представлена интенсивность изнашивания упрочнённых образцов при режиме трения № 3 (P равно 18,2 кПа, V — 0,28 м / с) во времени (рисунок 6).



1 — сталь 65Г; 2 — сталь 51CrV4; 3 — чугун ВЧТГ

Рисунок 5. — Графики влияния времени испытания на интенсивность изнашивания



1 — сталь 65Г; 2 — сталь 51CrV4; 3 — чугун ВЧТГ

Рисунок 6. — Графики влияния времени испытания на интенсивность изнашивания

Очень малое начальное значение интенсивности изнашивания стали 65Г можно объяснить интенсивным переносом высокопрочного чугуна на поверхность образца. Дальнейшее резкое увеличение объясняется снятием поверхностной части твердого отбеленного чугуна и, как следствие, уменьшением износостойкости образца, что вызвано уменьшением размеров абразивных частиц. Увеличение интенсивности изнашивания образцов из стали 51CrV4 и чугуна ВЧТГ объясняется увеличением фактической площади трения. Дальнейшее снижение и стабилизация вызваны уменьшением размеров абразивных частиц. На данном режиме испытаний также отмечено увеличение износостойкости упрочнённых образцов по сравнению с неупрочнёнными (в 1,1...1,4 раза).

Проведённые испытания упрочнённых образцов позволяют заключить, что использованный метод упрочнения в зависимости от режима испытаний повысил износостойкость образцов из всех представленных материалов в 1,1...1,5 раза.

Представлена зависимость интенсивности изнашивания упрочнённых образцов от скорости скольжения (рисунок 7).

Видно, что наименьшую интенсивность изнашивания проявляет сталь 51CrV4, наиболее высокую — сталь 65Г (см. рисунок 7). Интенсивность изнашивания всех образцов с повышением скорости возрастает, что связано с увеличением пути трения за одинаковое время. Также можно отметить, что интенсивность изнашивания упрочнённых образцов значительно ниже, чем неупрочнённых.

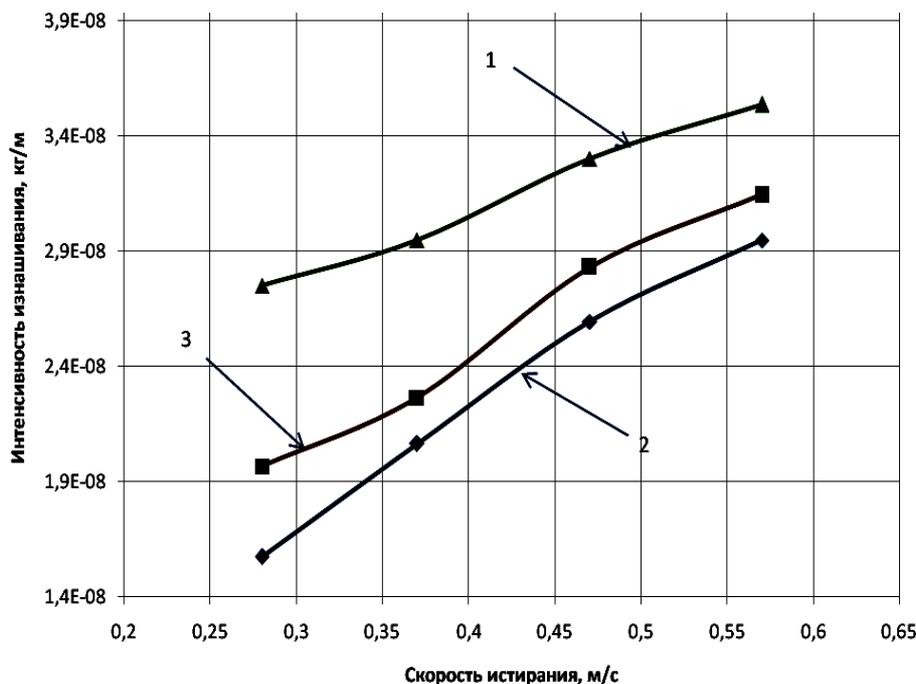
Анализ видов изнашивания производился на всех образцах до и после упрочнения при увеличении изображения в 50 раз. Было выявлено, что характер изнашивания примерно одинаков. Можно увидеть царапины *1*, являющиеся результатом абразивного изнашивания (рисунок 8, *а*). Также можно отметить наличие трещин, расположенных перпендикулярно направлению движения абразивных частиц, что является результатом усталостного изнашивания.

При условии дальнейшего воздействия абразивных частиц вследствие усталостного изнашивания возможны выкрашивания участков материала между царапинами.

Виден также результат выкрашивания материала между царапинами *1* из-за влияния усталостного и адгезионного изнашивания материала. Отчётливо видна большая усталостная трещина *2*, которая впоследствии приведёт к отделению крупного участка материала (см. рисунок 8, *б*).

Можно сделать вывод, что доминирующим видом изнашивания является абразивное; адгезионное и усталостное изнашивания вносят значительно меньший вклад.

В ходе проведения триботехнических испытаний влияние коррозии на образцы выявить было проблематично вследствие непродолжительности эксперимента (15 мин на одно испытание). Но было отмечено, что коррозии подвергся поддон, который более продолжительное время находился в контакте с коррозионно-активной средой. Поэтому коррозионные испытания производились отдельно. Образцы помещались в водный раствор NaCl и KCl (3...5 масс. %) на 100 ч, затем извлекались, просушивались, промывались в спиртовом растворе, тщательно высушивались, протирались до максимального удаления остатков коррозионных процессов и взвешивались. По потере массы и соотношению полученных данных с результатами триботехнических испытаний можно судить о влиянии коррозионных процессов на общие показатели (таблица 4).



1 — сталь 65Г; 2 — сталь 51CrV4; 3 — чугун ВЧТГ

Рисунок 7. — Влияние скорости испытания на интенсивность изнашивания

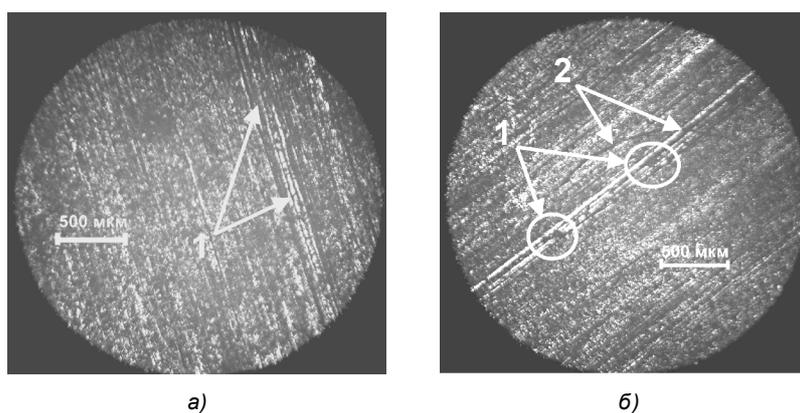


Рисунок 8. — Фотография изношенных поверхностей. $\times 50$

Т а б л и ц а 4. — Результаты коррозионных испытаний

Материал образца	Потеря массы $V m$, г
ВЧТГ	0,00275
65Г	0,00655
51CrV4	0,00315

По полученным результатам можно сделать вывод, что коррозия не оказала существенного влияния на проведённые триботехнические испытания представленных материалов. Потеря массы после коррозионных испытаний в течение 100 ч соответствует потере массы после триботехнических испытаний в течение 5 мин на режиме трения № 2 (P равно 18,2 кПа, V — 0,57 м / с).

Заключение. Проведённые испытания упрочнённых образцов позволяют сделать вывод, что использованный электрофрикционный метод упрочнения в зависимости от режима испытаний повысил износостойкость образцов из всех представленных материалов в 1,1...1,5 раза, причём наибольшей износостойкостью обладали образцы из чугуна ВЧТГ. Зона упрочнения может достигать 400 мкм, присутствует также зона термического влияния и зона легирования.

Доминирующим видом изнашивания является абразивное; адгезионное и усталостное изнашивание вносят значительно меньший вклад.

Список цитируемых источников

1. Измельчающие аппараты современных кормоуборочных комбайнов / М.И. Белов [и др.] // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2012. № 3. С. 43—50.
2. Основные требования к износостойкости режущих элементов кормоуборочных комбайнов / А.А. Дюжев [и др.] // Сельскохозяйственные машины для уборки зерновых культур, кормов и корнеклубнеплодов. Состояние, тенденции и направления развития : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 2004. С. 57—64 ; Кравченко И.Н., Пучин Е.А. Основы надёжности машин : в 2 ч. М. : Машиностроение, 2007. Ч. 1. 224 с. ; Прейсман В.И. Основы надёжности сельскохозяйственной техники. Днепропетровск, 1972. 340 с. ; Власов П.А. Надёжность сельскохозяйственной техники. Пенза : РИО ПГСХА, 2001. 124 с. ; Босой Е.С., Верняев О.В. Теория, конструкция и расчёт сельскохозяйственных машин. М. : Машиностроение, 1978. 457 с. ; Лезин П.П. Основы надёжности сельскохозяйственной техники. Саранск, 1997. 223 с. Аллилуев В.А. Техническая диагностика тракторов и сложных сельскохозяйственных машин на промышленной основе : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Л. : 1984. 33 с. ; Надёжность в технике. Термины и определения : ГОСТ 27.002-83. М. : Изд-во стандартов, 1983. 30 с. ; Надёжность и эффективность в технике : справ. : в 10 т. Т. 8 : Эксплуатация и ремонт / под ред. В.И. Кузнецова и Е.Ю. Барзиловича. 320 с.
3. Измельчающие аппараты современных кормоуборочных комбайнов / М.И. Белов [и др.]. С. 43—50.
4. Резник Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчёта режущих аппаратов. М. : Машиностроение, 1975. 311 с. ; Турбин Б.Г., Лурье А.Б., Григорьев С.М. Сельскохозяйственные машины. Теория и технологический расчёт. М. : Машиностроение, 1967. 357 с.
5. Микрюков В.М., Сазонов О.А. Применение бейнитного высокопрочного чугуна // Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом и аустенитно-бейнитной матрицей. Современные материалы для литых деталей : инф. сб. техн. материалов. М. : Металлургия, 2004. С. 260—262 ; Шебашинов М.П. Высокопрочный чугун в машиностроении. М. : Машиностроение, 1988. 216 с. ; Псырков Н.В., Капитонов А.А., Замятин В.О. Опыт внедрения специального чугуна марки ВЧТГ для изготовления ножей режущих барабанов кормоуборочной техники // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. / редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. 2013. Вып. 2. С. 388—390.

Поступила в редакцию 31.05.2016.