

УДК 631.363

**Сергеев Николай Степанович**, докт. техн. наук, профессор,  
профессор кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка,  
и механизация и технология животноводства», ФГБОУ ВО  
Южно-Уральский государственный аграрный университет

**Крячко Иван Сергеевич**, магистрант кафедры  
«Эксплуатация машинно-тракторного парка, и механизация  
и технология животноводства», ФГБОУ ВО Южно-Уральский  
государственный аграрный университет

**Бычкова Наталья Михайловна**, магистрант кафедры  
«Эксплуатация машинно-тракторного парка, и механизация  
и технология животноводства», ФГБОУ ВО Южно-Уральский  
государственный аграрный университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА

**Аннотация.** В статье представлены результаты экспериментальных исследований на износостойкость высокопрочного чугуна для изготовления рабочих органов центробежно-роторного измельчителя фуражного зерна ИЛС-0,15. Предложены рекомендации о целесообразности применения ВЧ для изготовления рабочих органов измельчителей фуражного зерна с последующей производственной проверкой.

**Ключевые слова:** животноводство, рацион, комбикорм, высокопрочный чугун, измельчение, абразив, износостойкость.

**Актуальность темы.** Повышение надежности и долговечности сельскохозяйственной техники при экономии всех видов ресурсов, снижении металлоемкости, стоимости производства, эксплуатации и ремонта является основой технической политики не только в нашей стране, но и во всем мире.

Главная причина отказов сельскохозяйственных машин – изнашивание их рабочих органов. Скорости изнашивания достигают 0,1...100 мкм/ч. Серьезной причиной внезапных отказов являются усталостные поломки, обусловленные длительным действием повторных напряжений при нормальных условиях эксплуатации в абразивной среде. Благодаря проведенным исследованиям многих авторов было установлено, что абразивное изнашивание происходит если твердость абразива превышает твердость материала из которого изготовлена изнашиваемая поверхность [1].

Актуальность исследований в области чугунов на сегодняшний день не вызывает сомнений. Доля выпуска низкокачественных серых чугунов с пластинчатым графитом уменьшается, наблюдается устойчивый рост применения в машиностроении наиболее высококачественных марок высокопрочных чугунов (ВЧ).

В данной статье представлен обзор и анализ свойств высокопрочного чугуна, который отличается высокой пластичностью, хорошей механической обрабатываемостью и устойчивостью к циклическим нагрузкам.

Таким образом, высокопрочный чугун значительно превосходит многие марки стали по химическим и механическим свойствам. Повышение надежности и долговечности сельскохозяйственной техники являются весьма актуальными.

**Цель исследования.** Повышение эффективности эксплуатационных показателей центробежно-роторного измельчителя фуражного зерна ИЛС за счет изготовления рабочих органов из высокопрочного чугуна.



Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить область применения и физико-механические свойства высокопрочных материалов.
2. Обосновать выбор высокопрочного чугуна для изготовления рабочих органов измельчителей зерна.
3. Провести экспериментальные исследования на износостойкость высокопрочного чугуна.
4. Представить заключение о целесообразности применения ВЧ для изготовления рабочих органов измельчителей фуражного зерна ИЛС.

**Материалы и методы.** В последнее время в области конструкционных материалов растет роль литейных сплавов, микролегированных и модифицированных с небольшими присадками химически активных элементов, что связано с высоким качеством, надежностью и долговечностью высокопрочного чугуна (ВЧ) при относительно низкой стоимости их производства. Механические и эксплуатационные свойства отливок из ВЧ находятся на уровне стальных, а по износостойкости даже превосходят их.

Обязательным при производстве отливок из высокопрочного чугуна является модифицирование с целью получения шаровидного графита, низкое содержание серы (менее 0,012 %) при отсутствии в химическом составе демодификаторов (Bi, Se, Al, Ti, As, Pb). Поэтому в мировой практике в последние годы наметилась тенденция по замене изделий из стали, серого и ковкого чугунов модифицированным высокопрочным чугуном с шаровидным и вермикулярным графитом. Чугун с шаровидным графитом, т.е. высокопрочный чугун, получил широкое применение в мировой практике. Это вызвано его технико-экономическими преимуществами, а также высокими эксплуатационными свойствами [2, 3, 4].

За рубежом ВЧ массово применяется для изготовления шестерен главной передачи автомобильной трансмиссии тяжелых грузовиков фирм «Форд», «Крайслер», деталей подвески железнодорожных вагонов (фирма «Zanardi»), почвообрабатывающего инструмента и др. Среди стран, наиболее крупных производителей отливок из высокопрочного чугуна, в настоящее время первое место, бесспорно, и с большим отрывом занимает Китай – 50% всего мирового производства, далее следуют США – 13%, Япония – 7%, Германия – 7%, Индия – 5%. Россия не входит даже в первую десятку производителей высококачественных марок чугуна, а Беларусь находится почти в самом конце [5, 6, 7].

Повышения надежности и долговечности сельскохозяйственной техники при снижении металлоемкости требуют комплексного решения. Рассматривая проблему приготовления кормов для сельскохозяйственных животных и птицы следует учитывать не только многообразие видов кормов и их свойства, но и различные технологии, и способы их обработки. Основные способы делятся по роду энергии, затрачиваемой на механические, тепловые, химические, биологические и биохимические технологические процессы. К механической технологии обработки различных материалов следует отнести механическое воздействие рабочих органов машины на материал [8].

Около 45...50% всего мирового производства зерна используется для кормления сельскохозяйственных животных, в основном в виде комбинированных кормов. Основой всех комбинированных кормов является зерно злаковых, семена бобовых и продукты их переработки, составляющие от 30 до 80 % всей массы корма. Скармливание неподготовленного зерна снижает эффективность его использования на 10...20% [9, 10].

Многочисленные работы и исследования посвящены изучению практики эксплуатации, изнашиванию конкретных видов машин и отдельных деталей, расчетам износостойкости, взаимосвязи различных металлургических факторов с эксплуатационными характеристиками металла [11, 12].

В Южно-Уральском аграрном университете более 20 лет ведутся научно-исследовательские работы по созданию машин и оборудования нового поколения для переработки фуражного зерна. В настоящее время серийно выпускаемые центробежно-роторные измельчители фуражного зерна и семян масличных культур ИЛС-5, ИЛС-0,5, ИЛС-0,15 (Автор, профессор Н.С. Сергеев), занимают достойное место в сельскохозяйственной отрасли РФ [13].



Измельчители предназначены для измельчения фуражного зерна и семян масличных культур с целью получения высококачественной фуражной муки, а также для измельчения компонентов, используемых в хлебопекарной и кондитерской промышленности, специй для производства колбас, лекарственного сырья и гранул в фармацевтике.

В агрегатах ИЛС использована принципиально новая технология измельчения, при которой материал разрушается посредством среза и скалывания. Это позволяет значительно снизить удельную энергоемкость процесса, содержание пылевидной фракции, которая составляет не более 5%, обеспечить зоотехнический требуемый и регулируемый модуль помола.

Рабочими органами измельчителя ИЛС- 0,15 являются горизонтально и соосно установленные два диска (статор и ротор) с возможностью вращения ротора в противоположные стороны, на рабочих поверхностях которых выполнены кольцевые выступы. Выступы верхнего диска-статора расположены между выступами нижнего диска-ротора. Кольцевые выступы в радиальном направлении имеют сквозные пазы-каналы, образуя, таким образом, режущие элементы в виде пуансонов. Стенки сквозных пазов-каналов смежных кольцевых выступов наклонены к рабочей поверхности дисков в противоположные стороны, образуя в режущей паре угол защемления, который обеспечивает процесс резания со скольжением. Конструкция рабочих органов измельчителя разработана таким образом, что одновременно с процессом измельчения нескольких компонентов, осуществляется высококачественное их смешивание. Данные измельчители могут применяться в подсобных хозяйствах городского и сельского жителя в качестве самостоятельных измельчающих машин.

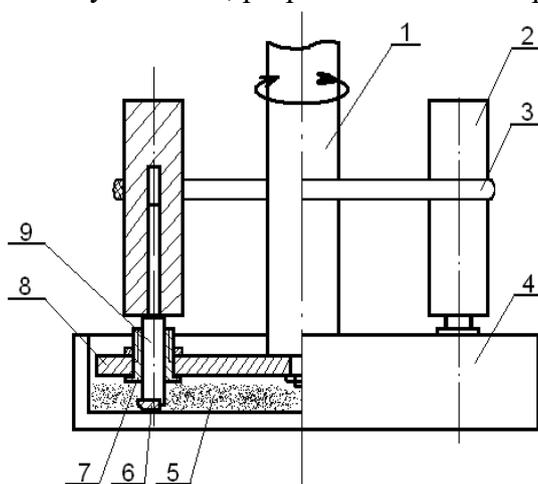
### Результаты экспериментальных исследований.

Для проведения лабораторных сравнительных испытаний использовали высокопрочный чугун, полученный в производственных условиях на опытном участке ЧТЗ и сталь 40Х. Для выплавки чугуна был взят следующий материал шихты чугуна с химическим составом, %: С – 3,05; Cr – 0,11; Si – 1,12; S – 0,013; Mn – 0,5; P – 0,04.

- чушки чугунные -75кг;
- сталь 40Х (обрезь) – 75 кг;
- бой графита – 1,2 кг;
- Фс 75 - 1,2 кг.

Для модифицирования полученного чугуна был использован быстроохлажденный модификатор Фс Мг 6К26 и ферросилиций Фс 65 Ба 1.

Модифицирование осуществляли в ковше. Масса металла в ковше (в зависимости от его заполнения плавильщиком) менялась от 33 до 47 кг, что предопределило различную степень модифицирования в каждом случае. Это позволило получить ВЧ с различным содержанием перлита в металлической основе (от 10...15% до 80...85%) при температуре модифицирования 1380...1400°С [14, 15]. Испытание стальных и чугунных образцов на износостойкость проводилось на установке, разработанной в ЮУрГАУ (рисунок 1).



1 – шпиндель; 2 – груз; 3 – кольцо упругое; 4 – чаша; 5 – абразивная среда;  
6 – образец; 7 – втулка направляющая; 8 – диск; 9 – образцедержатель.

Рисунок 1 – Установка для испытания материалов в абразивной среде

Установка состоит из следующих основных частей: на шпинделе 1 посредством резьбового соединения прикреплен диск 8, который во время работы вращается вместе со шпинделем. На диске по окружности на одинаковом расстоянии друг от друга имеются отверстия, в которые вставлены направляющие втулки 7, служащие для установки образцедержателей 9. Образцедержатель выполнен таким образом, чтобы на его верхнюю часть можно было установить груз 2, а на нижней его части закрепить образцы 6, которые подвергаются испытанию на износостойкость. Во время работы установки чаша 4 заполняется жидким абразивом (смесь песка с водой или другой жидкостью).

Шпиндель посредством ременной передачи получает вращение от двигателя мощностью 3 кВт. Частота вращения шпинделя с диском составляет 100...120 об/мин. Окружная скорость образцов во время испытаний составляет 2,1...2,5 м/с.

В целях безопасности в процессе работы установки грузы закрепляются упругим кольцом 3. Масса груза приблизительно 10 кг. Общая масса установки – 300кг.

#### ***Методика и порядок проведения опытов***

Для исследования на истирание были взяты образцы полученного высокопрочного чугуна с ферритно-перлитной структурой, содержащие примерно 85, 15 и 10% перлита (рисунок 2, 3, 4).

Повышение содержания феррита и понижение перлита (15 и 10%) явились следствием повышенного содержания кремния в модифицированном чугуне (таблица 1).

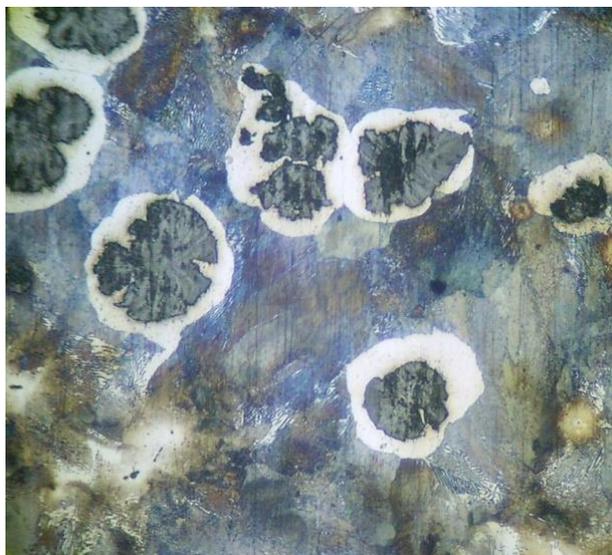


Рисунок 2 - ВЧ без термообработки. Микроструктура – графит шаровидный в обрамлении феррита (белое поле) + перлит (темное поле).

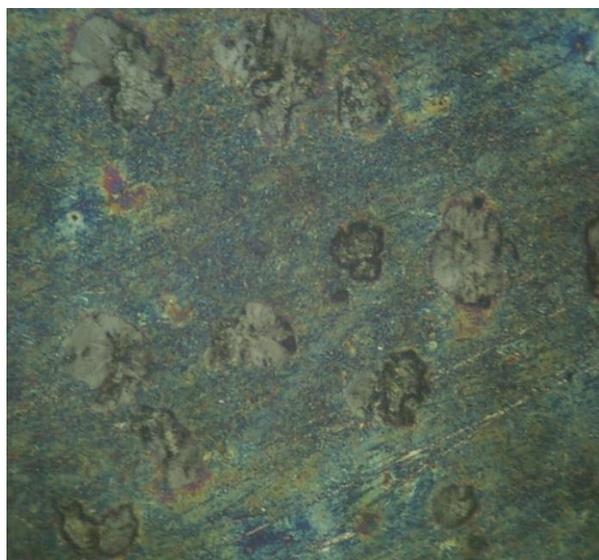


Рисунок 3 - ВЧ первого режима термообработки. Микроструктура – мартенсит мелко-игольчатый + шаровидный графит.

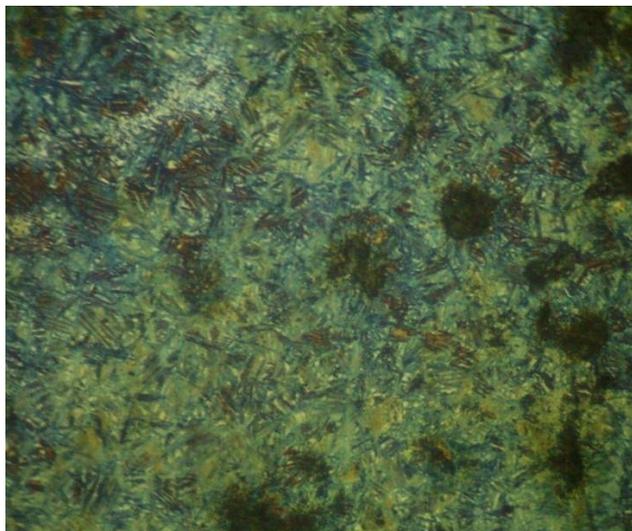


Рисунок 4 - ВЧ второго режима термообработки.  
Микроструктура – мартенсит крупно-игольчатый + шаровидный графит.

Таблица 1

Химический анализ образцов из высокопрочного чугуна

Номер пробы	Содержание перлита, %	C	Si	Mn	Cr	S	P	Mg
1	85	2.74	2.11	0.53	0.05	0.013	0.034	0.47
2	15	2.72	2.98	0.51	0.10	0.013	0.040	0.04
3	10	3.36	3.00	0.43	0.03	0.019	0.042	0.04

Для сравнительных испытаний чугуна был взят образец стали 40Х, из которой в настоящее время изготавливают рабочие органы измельчителя фуражного зерна ИЛС-15.

Опыты по испытанию образцов на износостойкость проводились в следующем порядке:

1. замер твердости образцов;
  2. каждый образец в отдельности взвешивался на лабораторных (электронных) весах с точностью 0,001;
  3. подготовка установки к работе (рисунок 1):
    - поднять диск с направляющими в верхнее положение и зафиксировать зажимом;
    - смазать солидолом образцедержатели и направляющие втулки;
    - вставить образцы, чашу установки заполнить жидким абразивом, опустить диск с направляющими в рабочее положение и зафиксировать зажимом;
    - установить грузы на образцедержатели и повернуть шпиндель установки вручную.
- При этом следует убедиться, что все образцы находятся в своих гнездах;
- все грузы зафиксировать упругим кольцом.
4. Произвести пуск установки, одновременно включив секундомер.
  5. После трех минут работы установку выключить, снять упругое кольцо с грузов, снять грузы, поднять диск с направляющими и зафиксировать его в поднятом положении, извлечь из чаши образцы, промыть их водой и высушить.
  6. Взвесить каждый образец на электронных весах, данные занести в таблицу.
  7. Определить величину износа каждого образца. Для этого следует вычесть вес после изнашивания из веса до изнашивания.
  8. Повторить операции п. 2-7 пять-шесть раз.

По полученным данным строится график для каждого образца в отдельности: по оси ординат – величина износа, по оси абсцисс – время, через три минуты, т.е. 3, 6...15, 18 минут. На графике отмечалась величина износа образцов после каждых трех минут испытаний. Для того чтобы получить величину износа образцов после шести минут, следует суммировать величину износа первого и последующих испытаний.

После проведения всех операций для всех образцов делалась термообработка, после чего операции 1-9 повторялись.

**Результаты и анализ экспериментальных исследований.**

Образцы высокопрочного чугуна с различным содержанием перлита в металлической основе и сталь 40X были испытаны на истираемость в "сыром" и термообработанном виде. Результаты испытаний образцов до термообработки приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты испытаний образцов на износостойкость до термообработки

Материал образцов	Величина износа, г/см <sup>2</sup>							Общий износ
	До испытания	1	2	3	4	5	6	
Сталь 40X	0	0,193	0,187	0,163	0,123	0,137	0,153	0,956
ВЧ50 <sub>1</sub> *	0	0,155	0,150	0,130	0,100	0,120	0,110	0,765
ВЧ50 <sub>2</sub>	0	0,100	0,100	0,090	0,100	0,100	0,110	0,600
ВЧ50 <sub>3</sub>	0	0,120	0,100	0,120	0,120	0,120	0,120	0,700

\* ВЧ 50<sub>1</sub> – содержание перлита 85%; ВЧ 50<sub>2</sub> – содержание перлита 15%;  
 ВЧ 50<sub>3</sub>- содержание перлита 10%

Из полученных данных видно, что как стальной, так и чугунные образцы обладают достаточной высокой изнашиваемостью. Рабочие органы сельскохозяйственных машин подвергаются термической обработке, после чего можно судить о преимуществах какого-либо материала. Поэтому нами была проведена термообработка как для чугунных (ВЧ), так и для стального (сталь 40X) образцов. Сталь 40X подвергли полной закалке и низкому отпуску. После термообработки образцы вновь подвергались испытаниям. Результаты испытаний представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты испытаний образцов на износостойкость после термообработки

Материал образцов	Величина износа, г/см <sup>2</sup>							Общий износ
	До испытаний	1	2	3	4	5	6	
Сталь40X	0	0,063	0,047	0,065	0,040	0,045	0,052	0,312
ВЧ 50 <sub>1</sub>	0	0,050	0,043	0,042	0,042	0,032	0,040	0,252
ВЧ 50 <sub>2</sub>	0	0,055	0,060	0,060	0,055	0,055	0,055	0,340
ВЧ 50 <sub>3</sub>	0	0,065	0,050	0,050	0,050	0,055	0,050	0,320

Таблица 4

Значения твердости испытываемых образцов до и после термообработки

Материал образцов	До закалки, HRB	После закалки, HRB	После отпуска, HRB
Сталь 40X	90	58	55
ВЧ 50 <sub>1</sub>	98	55	47
ВЧ 50 <sub>2</sub>	99	48	39
ВЧ 50 <sub>3</sub>	91	45	42

Сравнение кривых удельной истираемости термообработанных стального и чугунных (ВЧ) образцов (рисунок 5) показывает, что высокопрочный термообработанный чугун практически не уступает стальному, а чугун ВЧ 50<sub>1</sub> с высоким содержанием перлита (85%) после термообработки даже превосходит стальной по сопротивлению истирающим нагрузкам примерно на 20%.



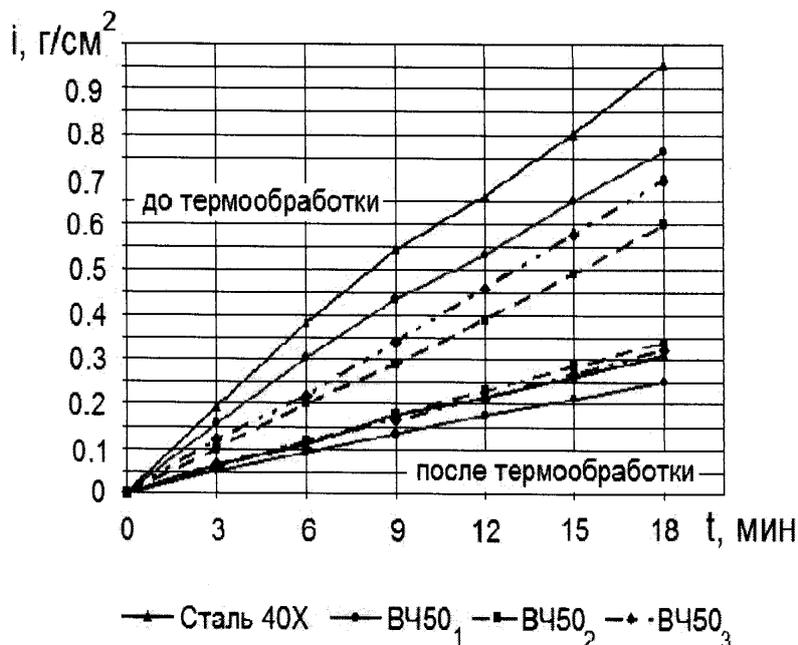


Рисунок 5 – График удельной истираемости стального и чугунных образцов до и после термообработки

Из рисунка 6 видно, что образец ВЧ 50<sub>1</sub> с твердостью 46-48 HRC обладает наименьшим удельным износом по сравнению с другими образцами, у которых твердость меньше. На основании этого можно сделать вывод, что сопротивление истирающим нагрузкам у высокопрочного чугуна тем больше, чем больше его твердость, при этом можно заметить, что, имея твердость 46-48, чугунный образец изнашивается меньше, чем стальной, у которого твердость 54-56, что подтверждает гипотезу о том, что для высокопрочного чугуна высокая твердость в меньшей мере влияет на износные характеристики, чем у стали.

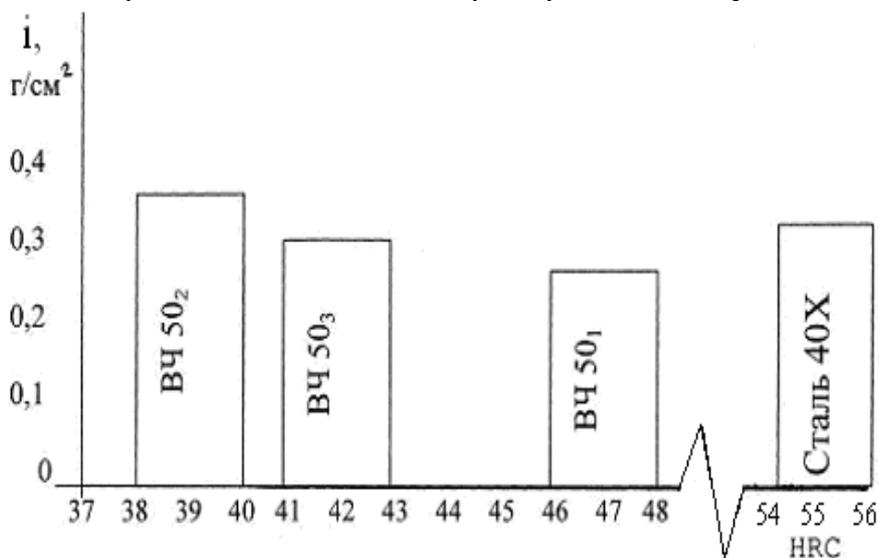


Рисунок 6 – График зависимости истираемости высокопрочного чугуна от его твердости

### ВЫВОДЫ:

1. Обзор и анализ рассмотренных литературных данных и результатов экспериментальных исследований дает основание для заключения о том, что высокопрочный чугун можно рассматривать как перспективный конструкционный материал.

2. Высокопрочный чугун (ВЧ) можно использовать для изготовления рабочих органов СХМ, в частности, для изготовления рабочих органов измельчителей зерна ИЛС-0,15 вместо стали 40Х.

3. Окончательный вывод о целесообразности применения ВЧ для изготовления рабочих органов для измельчителей фуражного зерна ИЛС можно будет сделать после широких производственных испытаний.

**Список литературы:**

1. Износ деталей сельскохозяйственных машин/ под ред. М.М. Севернова. -Л.: Колос, 1972. -288с.
2. Новые исследования свойств и технологии получения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом [Текст]: [Сборник статей] / Науч. ред. проф. д-р техн. наук Б. С. Мильман, канд. техн. наук Н. И. Ключнев. - Москва: Отд. науч.-техн. информации, 1964. - 95 с.
3. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. – М.; Машиностроение, 1976.
4. Гольдштейн Я. Е. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. – М.; Металлургия, 1986.
5. Вороненко Б. И. Разработка и перспектива применения высокопрочного чугуна. Итоги науки и техники. Металловедение и термическая обработка. – М.; ВИНТИ, 1991.
6. Бубликов В.Б. Высокопрочному чугуну - 60. - // М.: Литейное производство, 2008, №11. – С. 2-8.
7. Гнауш В.А., Дорошенко В.С. Мировой рынок литья чугуна с шаровидным графитом. Состояние и перспективы развития//Вестник арматуростроителя. 2017.– №5.- С. 112-119.
8. Макаров А.П., Исследование технологического процесса измельчения фуражного зерна: Диссертация кандидата технических наук. – М.; Колос, 1961.
9. Стратегия машинно-технологического обеспечения производства продукции животноводства на период до 2020 года//М.: ФГНУ Росинформагротех, 2009.
10. Шарнин В.В. Перемен требуют рынки зерна, комбикормов и свинины//Комбикорма. 2008. №7. С 44-45.
11. Износ деталей сельскохозяйственных машин/ под ред. М.М. Севернова. -Л.: Колос, 1972. -288с.
12. Крагельский И. В., Алисин В. В. Трение, изнашивание и смазка. Справочник в 2-х т. – М.; Машиностроение, 1978.
13. Сергеев Н. С. Центробежно-роторные измельчители фуражного зерна. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Челябинск; ЧГАА, 2008.- 316 с.
14. Сергеев Н.С., Соловьев Н.М. Износостойкость рабочих органов из высокопрочного чугуна для измельчителей. Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2006. – №10. – С. 41- 42.
15. Свидетельство на полезную модель РФ № 20215. Плужный лемех / Н.М. Соловьев, Ю.М. Пруденко / Бюл. № 30, 27.10.2001.

