

УДК 669.13.018

## МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА МАРКИ ВЧТГ

А. А. НОВИКОВ, П. С. ДРОБЫШЕВСКИЙ,  
С. А. ТЮРИН, Д. С. ЧУМАК  
ОАО «Гомсельмаш», Беларусь

**Ключевые слова:** чугун ВЧТГ, механические свойства, прочность, пластичность, твердость, трещиностойкость, сопротивление механической и контактной усталости, износостойкость.

### Введение

Уровень прочности современных высокопрочных чугунов – Austempered Ductile Iron (ADI) ( $\sigma_b \sim 1000\text{--}1600$  МПа) является вполне конкурентоспособным по сравнению с конструкционной сталью. Но у всех известных высокопрочных чугунов есть один фундаментальный недостаток: повышение прочности неизбежно сопровождается значительным охрупчиванием металла. Так, при росте предела прочности в 1,5–2 раза относительное удлинение при разрыве уменьшается в 9–11 раз, что характерно как для традиционных марок, так и новых разработок (рис. 1) [1]–[4]. Кроме того, сопротивление усталости чугунов меньше, чем у стали – как при контактном нагружении, так и при изгибе (табл. 1) [5].

Однако у высокопрочных чугунов имеются и существенные преимущества по сравнению со сталью. Чугуны имеют высокую износостойкость. Так, относительная потеря объема при абразивном износе чугуна ADI примерно на 30 % меньше, чем у стали (при одинаковой твердости).

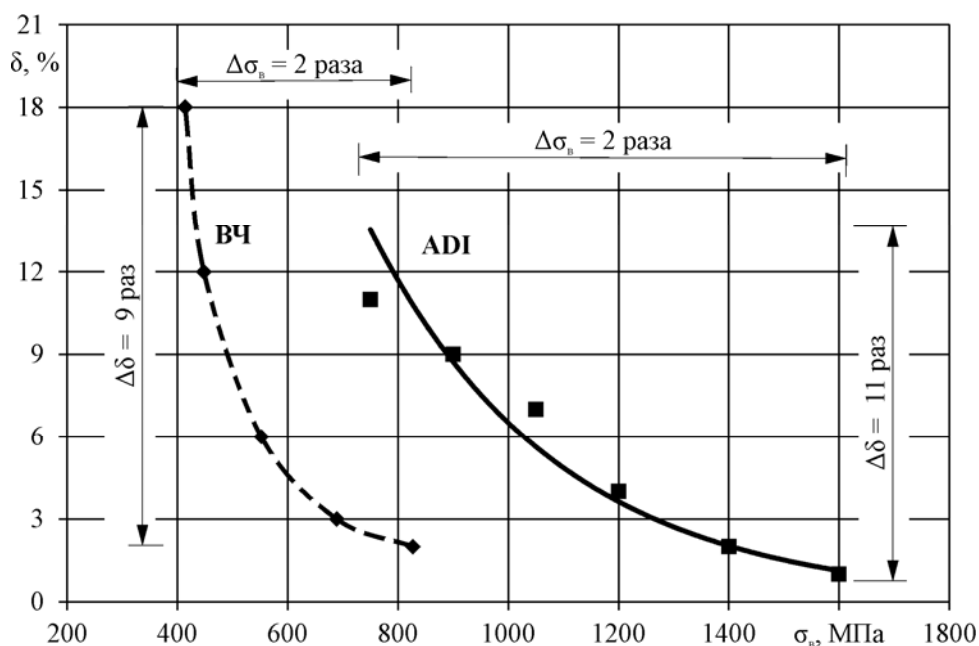


Рис. 1. Потеря пластичности (охрупчивание) высокопрочных чугунов с шаровидным графитом с ростом предела прочности

## ВЧТГ и сталь: служебные свойства

Материал	Предел выносливости, МПа	
	при контактном нагружении, $p_f$	при изгибе с вращением, $\sigma_{-1}$
ЧУГУН с шаровидным графитом (ISO 6336-5:2003(E))	625	229
Легированная термоупрочненная СТАЛЬ (ISO 6336-5:2003(E))	915	337
ВЧТГ (плавка № 25)	975	290

По сравнению со сталями чугуны имеют более низкие плотность и модуль упругости – на 10–12 % и 20 %, соответственно. При этом их относительная звукопоглощающая способность в 3–7 раз выше, чем у сталей [1]–[4]. Литые детали из чугуна намного дешевле (на 20–30 % и более) стальных, особенно ковано-сварных [6]–[8]; эффективность литья тем выше, чем сложнее конфигурация и больше масса стальных деталей и особенно сварно-стальных конструкций. Это связано с тем, что энергетические затраты на плавку чугуна до 50 % ниже, чем для стали (табл. 2) [9]. Кроме того, стоимость литых деталей и конструктивных элементов из чугуна определяется не только (и не столько) стоимостью металла и легирующих элементов для него, сколько рациональной и малозатратной технологией изготовления.

Таблица 2

## Сравнение расхода энергии в процессе изготовления деталей из чугуна ADI (Austempered Ductile Iron) и стали

Потребление электроэнергии, кВт · ч/т		
Технология производства	ADI	Сталь
Получение материала	2500	4500
Предварительная термообработка	–	500
Аустемперинг	600	–
Упрочнение	–	800–1200
<i>Итого</i>	3100	5800–6200
Экономия энергии около 50 %!!!		

В целом можно перечислить следующие достоинства высокопрочных чугунов по сравнению со сталью: хорошие антифрикционные свойства; способность быстро гасить вибрации и резонансные колебания; малая чувствительность к надрезам; меньший, чем у стали, удельный вес; повышенная теплопроводность; повышенные, по сравнению со сталью, литейные и технологические свойства; более низкая температура плавления; хорошая обрабатываемость резанием и др.

При этом достижение повышенных прочностных характеристик позволит еще в большей степени увеличить привлекательность высокопрочных чугунов для изготовления из них деталей машин, традиционно рассматриваемых как стальные изделия.

Целью работы является исследование механических свойств специального высокопрочного чугуна и определение применимости и перспектив использования этого материала для решения задач импортозамещения и повышения конкурентоспособности наиболее ответственных узлов машин и оборудования.

### Объекты и методы исследований

Объектом исследования является высокопрочный чугун разработки ООО «НПО ТРИБОФАТИКА» и ОАО «Гомсельмаш», маркируемый ВЧТГ [10]–[13].

Прочностные характеристики чугуна ВЧТГ исследовали по стандартной методике на растяжение [14]. Усталостные характеристики чугуна ВЧТГ исследовали по стандартной методике при консольном изгибе с вращением [15]. Характеристики трещиностойкости чугуна ВЧТГ исследовали по стандартной методике на призматических образцах с концентратором напряжений [16].

Изготовление и эксплуатационные испытания ножей режущих барабанов из чугуна ВЧТГ осуществлены по заданию ОАО «Гомсельмаш». С целью сравнительной оценки износостойкости данных ножей в полевых условиях ими были укомплектованы комбайны КВК-800, которые реализованы сельхозпредприятиям. Лабораторией износоусталостных испытаний ОАО «Гомсельмаш» организован надзор за работой этих машин. Износостойкость ножей в эксплуатации исследовали по методике [17].

### Результаты исследований и их обсуждение

Главное достоинство чугуна ВЧТГ состоит в том, что он обнаруживает оригинальную совокупность свойств: прочность, сопоставимую с современными легированными термоупрочненными сталями и одновременно технологические и служебные свойства как у современных высокопрочных чугунов с шаровидным графитом («два в одном»). Служебные свойства ВЧТГ хорошо регулируются путем соответствующего подбора режимов термообработки. ВЧТГ обнаруживает нетипичные особенности и свойства.

Диаграмма «прочность–пластичность» (рис. 2) характеризуется интересной закономерностью – соразмерно росту относительного удлинения происходит повышение предела прочности.

Пластические свойства ВЧТГ хорошо иллюстрирует диаграмма растяжения (рис. 3). Интервал между пределом прочности и пределом текучести составляет ~ 300 МПа, т. е. ~ 35 % от величины предела текучести.

Диаграмма «прочность–твердость» (рис. 4) нетрадиционна: с ростом прочности твердость ВЧТГ может либо пропорционально повышаться, либо, наоборот, соответственно снижаться в зависимости от условий термообработки. Это свойство можно практически использовать для поиска оптимального соотношения «прочность–твердость».

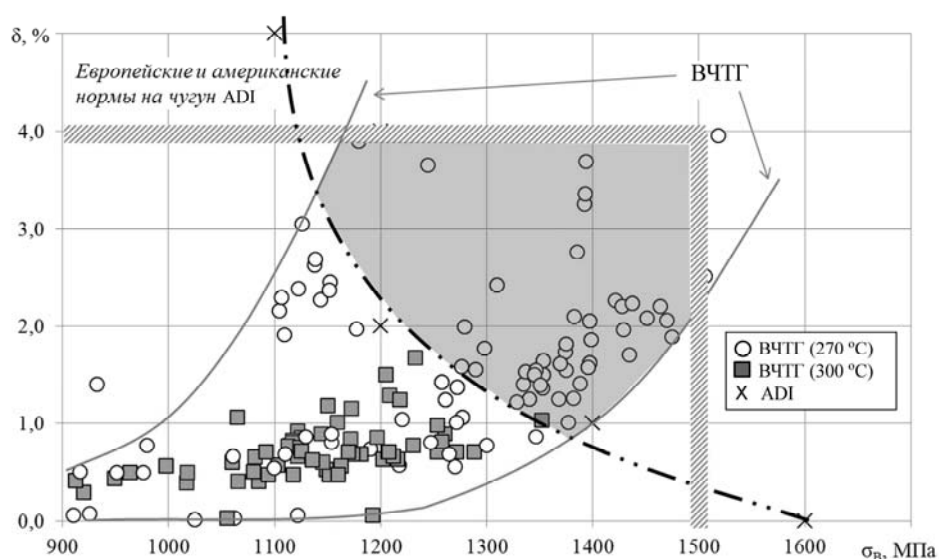


Рис. 2. Диаграммы «прочность–пластичность» для ADI и ВЧТГ при различных температурах изотермической выдержки при закалке

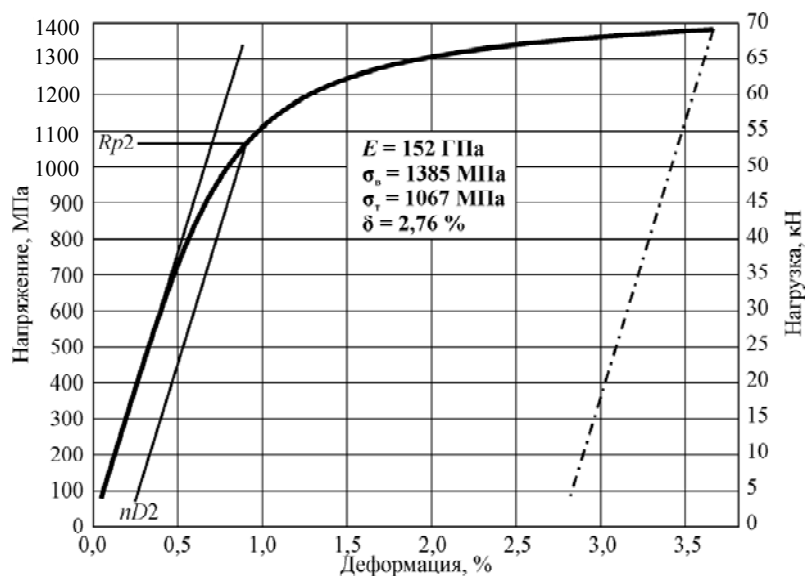


Рис. 3. Типичная диаграмма растяжения ВЧТГ

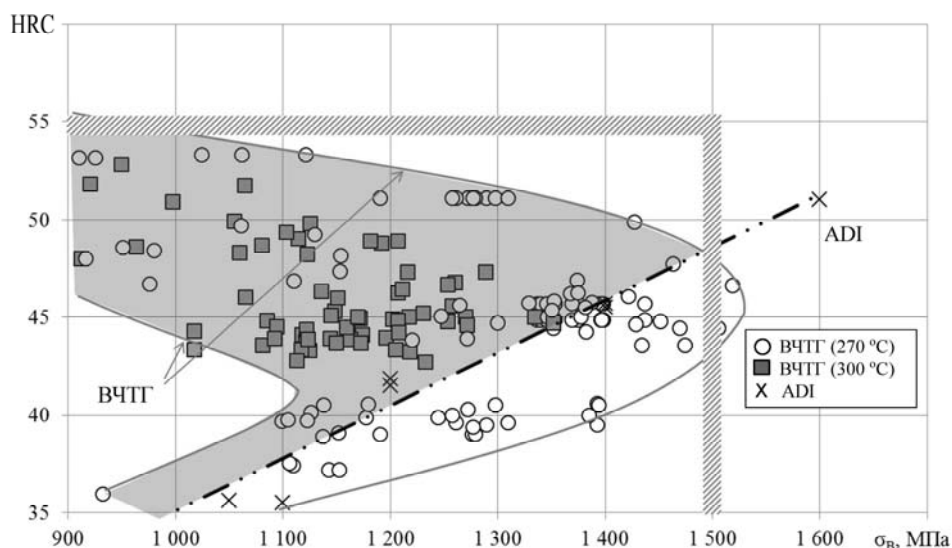


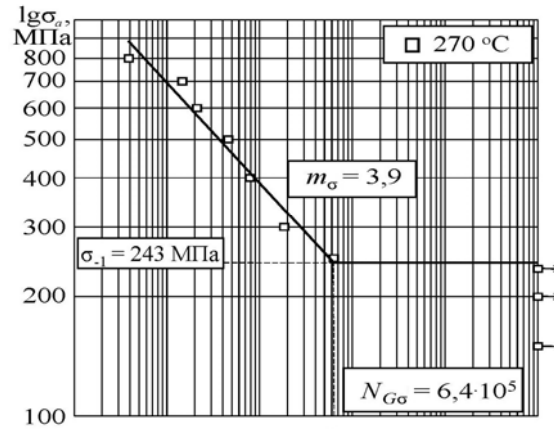
Рис. 4. Диаграммы «прочность–твердость» для ADI и ВЧТГ при различных температурах изотермической выдержки при закалке

Результаты испытаний на усталость для трех вариантов термической обработки образцов из чугуна ВЧТГ (температуры изотермической выдержки при закалке 270, 300 и 330 °С) представлены на рис. 5. Указанные режимы термообработки признаны характерными и наиболее представительными для ВЧТГ. Результаты испытаний показывают, что сопротивление усталости ВЧТГ сопоставимо и приближается к термоупрочненной стали.

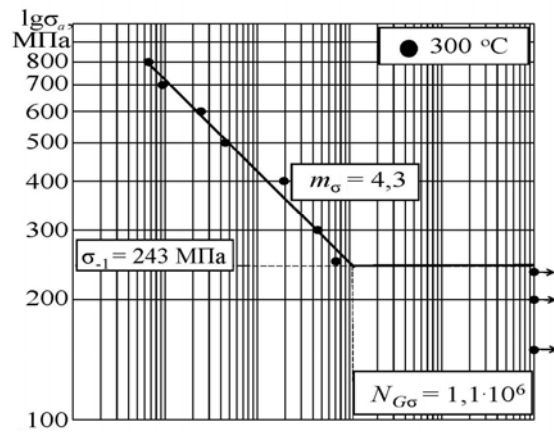
По характеристикам трещиностойкости ВЧТГ по меньшей мере не уступает катаной стали (рис. 6). Согласно рис. 6 у ВЧТГ трещиностойкость растет с повышением предела прочности, тогда как для катаной стали она слабо падает в интервале изменения предела прочности от ~ 1040 до ~ 1160 МПа.

С внедрением высокопрочного чугуна ВЧТГ появляется реальная перспектива импортозамещения в производстве различных ответственных узлов и деталей сельскохозяйственной техники. В ОАО «Гомсельмаш» работы в данном направлении уже ведутся.

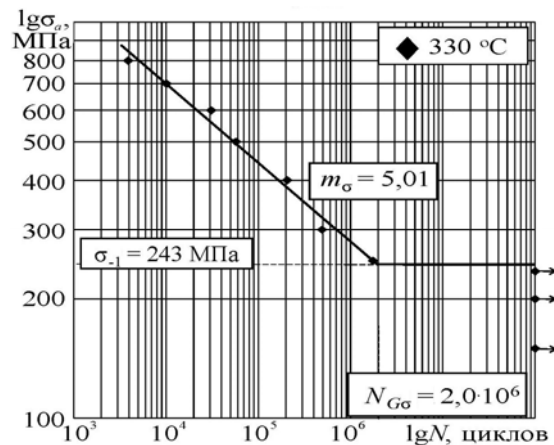
Сборочный узел «нож – прижим – болты – основание» (рис. 7) является одним из наиболее ответственных узлов режущего барабана комбайна КВК-800 производства ОАО «Гомсельмаш». В данном узле реализуется как контактное взаимодействие с трением ее компонентов, так и изгиб ножа вследствие резания зеленой массы.



а)



б)



в)

Рис. 5. Кривые механической усталости ВЧГГ. Микроструктура: а – мартенсит, бейнит (20 %), аустенит; б – мартенсит, бейнит (35 %), аустенит; в – бейнит (75 %), аустенит. На кривых дополнительно указаны температуры изотермической выдержки при закалке

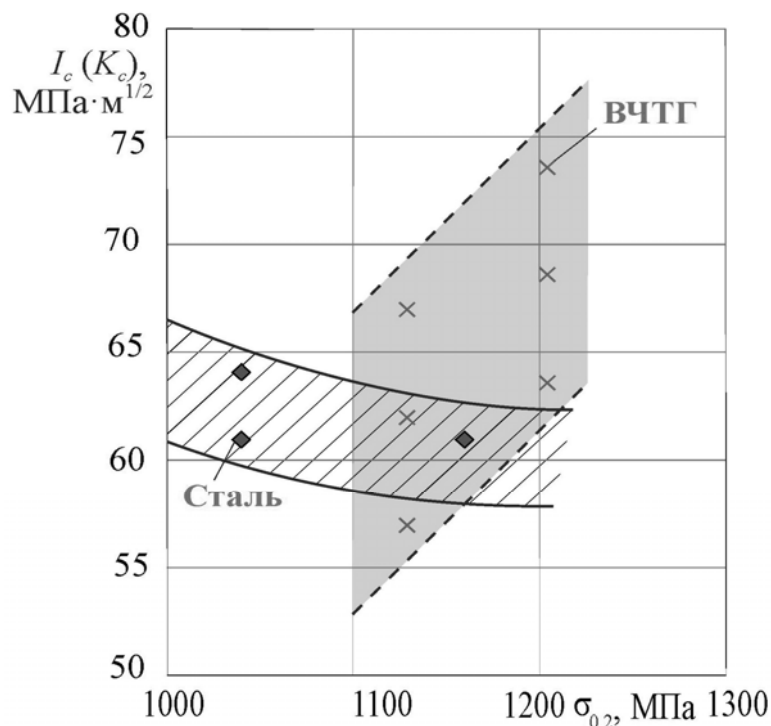
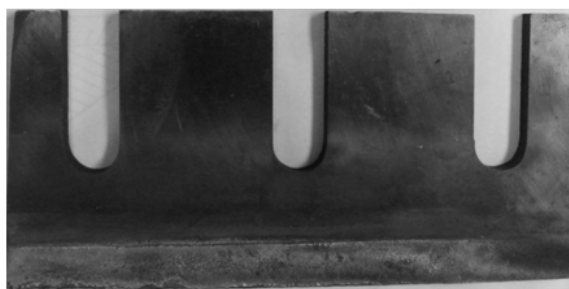


Рис. 6. Трещиностойкость: сопоставление ВЧТГ с катанными сталями



Режущий барабан комбайна КВК-800



Нож режущего барабана

Рис. 7. Общий вид режуще-измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна КВК-800 и ножа

Испытания опытных партий чугунных ножей (твердость 46–48 HRC) показали (рис. 8), что они удовлетворяют главному требованию: надежная работа в течение одного сезона, т. е. обеспечивается заготовка до 30 тыс. т зеленой массы. После указанной наработки износ чугунных ножей на 15 % меньше допустимого значения (для сравнения износ упрочненных импортных ножей в тех же условиях оказался на 25 % ниже допустимого). Вместе с тем себестоимость чугунных ножей минимум на 20 % ниже, чем импортных стальных.

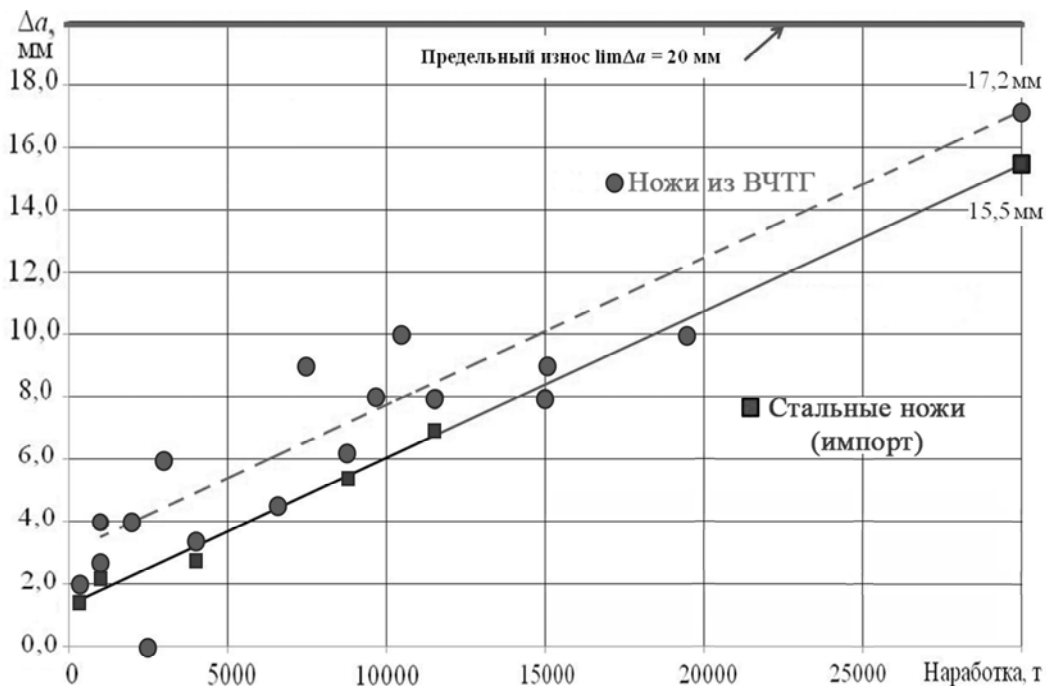


Рис. 8. График изменения ширины (износ + заточка) режущей кромки ножей из чугуна ВЧТГ (твердость 46–48 HRC) и стали (импорт) с наплавленной режущей кромкой твердым сплавом (53–55 HRC) в зависимости от наработки, построенный по результатам эксплуатационных испытаний

По нашему мнению, перспективы промышленного использования ВЧТГ не исчерпываются приведенным примером. Может быть поставлена и решена проблема создания эффективных режущих и измельчающих аппаратов и устройств для сельского хозяйства, химической промышленности и других отраслей народного хозяйства. Еще одна основная проблема – многообразные оси и валы массового применения, в том числе коленчатые и распределительные.

Определенная экономическая выгода может быть получена при переводе многочисленных и дорогих кузнечно-прессовых и сварных технологий для производства сложных и крупногабаритных изделий на литейную технологию с использованием чугуна с высокими механическими свойствами.

Полученные результаты были положены в основу разработанного и введенного в действие в 2013 г. стандарта предприятия (ОАО «Гомсельмаш») СТП 315-647–2013 «Общие требования к механическим свойствам высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧТГ по характеристикам прочности и пластичности при растяжении, механической и контактной усталости, ударной вязкости и твердости» [18].

Поскольку практическое применение ВЧТГ расширяется для весьма ответственных – трибофатических систем современных машин и оборудования, назрела необходимость стандартизации его основных механических свойств на уровне Госстандарта Республики Беларусь, что позволит обеспечить соответствующее качество ВЧТГ при производстве на разных предприятиях Республики Беларусь.

В настоящее время ОАО «Гомсельмаш» разрабатывает государственный стандарт Республики Беларусь СТБ «Высокопрочный чугун с шаровидным графитом и высоким сопротивлением усталости. Марки и механические свойства». Научно-методическое обоснование стандарта проводится в БГУ и ОИМ НАН Б по заданию ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия» (подпрограмма «Металлургия»).

### Заключение

В данной статье приведены результаты оценки механических и эксплуатационных свойств чугуна ВЧТГ. На примере эксплуатации ножей режущо-измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна КВК-800 показана возможность замены импортного материала отечественным чугуном ВЧТГ с соответствующей термообработкой. Комплексные исследования механических характеристик указанного чугуна позволяют прогнозировать возможность его широкого внедрения в машиностроительное производство в Республике Беларусь и за рубежом.

*Статья опубликована по результатам МНПК «Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра», состоявшейся 21–22 декабря 2017 г. в НТЦК ОАО «Гомсельмаш».*

### Литература

1. Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом и аустенитно-бейнитной матрицей. Современные материалы для литых деталей / Н. Н. Александров [и др.]. – М. : Metallurg, 2004. – 419 с.
2. Беликов, А. И. Отливки из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / А. И. Беликов, Л. А. Жуков, Д. Н. Маццарелли. – М. : Машиностроение, 2006. – 448 с.
3. Шебастинов, М. П. Высокопрочный чугун в машиностроении / М. П. Шебастинов. – М. : Машиностроение, 1988. – 216 с.
4. Щеголюк, Н. И. Сравнительные исследования конструкционной прочности чугуна и стали / Н. И. Щеголюк // Литейное пр-во. – 1993. – № 9. – С. 6–8.
5. ISO 6336-5:2003. Calculation of load capacity of spur and helical gears. Strength and quality of materials.
6. Корниенко, Э. Н. Разработка высокопрочных чугунов с повышенными специальными свойствами / Э. Н. Корниенко, М. С. Колесников. – Набережные Челны : КамПИ, 1999. – 293 с.
7. Зборщик, А. М. Доменный чугун с шаровидным графитом для крупных отливок / А. М. Зборщик, И. П. Бычков. – М. : Машиностроение, 1995. – 128 с.
8. Корниенко, Э. Н. Перспективы производства отливок ЧШГ аустенитно-бейнитного класса / Э. Н. Корниенко, А. Г. Панов, Д. Ф. Хальфин. – Елабуга : НЭК, 2001. – 213 с.
9. Roedter, H. ADI – Austempered Ductile Iron / H. Roedter (фирма RTIRON&TITANUM GMBH) // Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом и аустенитно-бейнитной матрицей. Современные материалы для литых деталей : информ. сб. техн. материалов / Metallurg ; под ред. Н. Н. Александрова [и др.]. – М., 2004. – С. 249–258.
10. Чугун с шаровидным графитом и высоким сопротивлением усталости : пат. 15617 Респ. Беларусь, МПК С 22С37/04 / Л. А. Сосновский, В. А. Жмайлик, Н. В. Псырков, В. О. Замятнин, В. В. Комиссаров ; заявители РУП «Гомсельмаш», ООО «НПО ТРИБОФАТИКА». – № a20101428 ; заявл. 04.10.2010 ; опубл. 30.04.2012. – 4 с.
11. Псырков, Н. В. Специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом как новый конструкционный материал / Н. В. Псырков // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 3 (20)/4 (21). – С. 213–218.



12. Чугун и сталь в трибофатических системах современных машин и оборудования / Л. А. Сосновский [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 4 (29). – С. 5–20.
13. Специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом как конкурент упороченной стали / В. А. Жмайлик [и др.] // Тр. VI Междунар. симп. по трибофатике (ISTF 2010), Минск, 25 окт. – 1 нояб. 2010 г. / редкол.: М. А. Журавков (пред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2010. – Т. 2. – С. 73–77.
14. Металлы. Методы испытаний на растяжение (Межгос. стандарт) : ГОСТ 1497–84. – Введ. 01.01.1986. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 22 с.
15. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость (Межгос. стандарт) : ГОСТ 25.502–79. – Введ. 01.01.1981. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 32 с.
16. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении / Механика катастроф. Определение характеристик трещиностойкости конструкционных материалов : метод. рекомендации. – М. : Изд. МИБ СТС, Ассоц. КОДАС, 1995. – С. 7–82.
17. Ножи кормоуборочных комбайнов КВК-800. Программа и методика сравнительных доводочных эксплуатационных испытаний. – Гомель : Гомсельмаш, 2014. – 20 с.
18. Общие требования к механическим свойствам высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧТГ по характеристикам прочности и пластичности при растяжении, механической и контактной усталости, ударной вязкости и твердости (Стандарт предприятия) : СТП 315–647–2013. – Введ. 30.08.2013. – Гомель : Гомсельмаш, 2013. – 17 с.

*Получено 12.02.2018 г.*