

УДК 620.178.3

Н.В. ПСЫРКОВ, главный инженер

ПО «Гомсельмаш», Республика Беларусь

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫСОКОПРОЧНЫЙ ЧУГУН С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ КАК НОВЫЙ КОНСТРУКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ

Представлены основные результаты исследований по изготовлению специального высокопрочного чугуна (марки ВЧТГ) с высокими механическими свойствами. Из чугуна ВЧТГ изготовлены опытные партии крупногабаритных зубчатых колес бортового редуктора энергетического средства УЭС-2-250, проводятся их натурные испытания. Отмечено, что с 2012 года все кормоуборочные комбайны КВК-800 комплектуются ножами из чугуна данной марки. Это позволяет при обеспечении практически одинаковой наработки со стальными ножами избежать катастрофического разрушения всей измельчающе-питающей системы при попадании посторонних предметов. Показано, что из данного чугуна возможно изготовить противорежущие брусья для кормоуборочных комбайнов КВК-800 и КСК-600.

Ключевые слова: чугун марки ВЧТГ, зубчатые колеса, ножи для измельчающих аппаратов, противорежущие брусья, рельсы

Введение. Начало производства бейнитных чугунов с шаровидным графитом относится к середине 60-х годов XX века. Главной причиной повышенного внимания ряда фирм к ним является значительное снижение энергозатрат при производстве деталей типа зубчатых колес, шатунов, распределительных валов, поворотных цапф передней оси подвески, элементов трения-торможения, меньшая склонность к образованию раковин (по сравнению со сталью), уменьшение припусков на мехобработку, снижение массы отливок на ~ 10 %, а также малое изменение размеров при термической обработке [1, 2, 3].

Автомобильные фирмы, такие, как Ford, General Motors, Mazda и другие, уже давно знают преимущества использования деталей из данного чугуна. В начале промышленного применения высокопрочного чугуна трудно было убедить инженеров, отвечающих за качество изделий, что этот новый материал, содержащий около 3,6—3,8 % углерода, имеет такую же прочность, как и сталь. Однако, когда Ford выпустил первые коленчатые валы из высокопрочного чугуна, этот материал стал популярен в мире.

Фирма General Motors испытывает и применяет на практике зубчатые колеса, коробки передач и рычаги подвески, изготовленные из бейнитных чугунов с шаровидным графитом (БЧШГ). Во всех случаях удалось сократить время изготовления и уменьшить массу отливок. В настоящее время благодаря применению зубчатых колес, выполненных из данного чугуна, передачи работают очень тихо, а присутствующий в основе графит действует как смазка во время работы. Так как производство отливок — это более простой процесс, чемковка, следовательно, производственные издержки также более низкие, а производительность очень высокая. Модельная оснастка значительно проще и дешевле, чем штампы, и ее можно изготавливать из дерева, металла и пластмассы [1, 2, 15]. Эксплуатационные характеристики БЧШГ не только не уступают, но

и во многих случаях превосходят многие виды традиционных конструкционных материалов [2].

Однако технологии данных процессов являются эксклюзивными и запатентованными. При этом исследования в данной области являются перспективными, поскольку ежегодно ученые открывают в этом материале какие-то новые свойства. В зависимости от химического состава и параметров термообработки можно получать изменение свойств высокопрочного чугуна в широком диапазоне [2].

В этой связи в 2006—2010 годах в рамках совместного выполнения ПО «Гомсельмаш», Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси, Межведомственной лабораторией «ТРИБОФАТИКА» и ООО «НПО ТРИБОФАТИКА» задания 1.32 «Разработать технологию изготовления, термообработки и методики испытаний литых зубчатых колес взамен колес, изготавливаемых из стальных поковок» Государственной комплексной программы научных исследований «Механика» были впервые разработаны рекомендации по химическому составу, термообработке и требуемым свойствам высокопрочного чугуна с шаровидным графитом для высоконагруженных зубчатых колес номенклатуры завода «Гомсельмаш», который специализируется на производстве высокопроизводительной и мощной сельскохозяйственной техники — современных самоходных комбайнов для уборки зерна, кормов, картофеля, сахарной свеклы, кукурузы и др.

Основные свойства чугуна ВЧТГ. В результате проведенной работы был получен (в предельно короткий срок) высокопрочный чугун с шаровидным графитом марки ВЧТГ (высокопрочный чугун фирмы ТРИБОФАТИКА (Т) и завода «Гомсельмаш» (Г)), который имеет особые механические свойства, регулируемые термообработкой: предел прочности при растяжении ~ 900...1400 МПа; относительное удлинение при разрыве ~ 1,5...3,5 % (в отдельных состояниях — 5%); твердость до 55 HRC. Главная особенность полученного

Таблица 1 — Типы чугуна ADI по европейскому и американскому стандарту

	Марки	σ_b , Н/мм ²	δ , %	НВ	HRC
Европейские нормы на чугун с шаровидным графитом ADI	EN-GJS-800-8	800	8	260—320	26—34
	EN-GJS-1000-5	1100	5	300—360	32—39
	EN-GJS-1200-2	1200	2	340—440	36,5—46,5
	EN-GJS-1400-1	1400	1	380—480	41—50
Американские нормы на чугун с шаровидным графитом ADI	1	850	10	269—321	27,5—34,4
	2	1050	7	302—363	32—39,2
	3	1200	4	341—444	36,7—47
	4	1400	1	388—477	41,8—49,6
	5	1600	н/д	444—555	47—55

чугуна состоит в том, что его характеристики сопротивления усталости практически достигают таковых для высокопрочной легированной стали. На данный чугун получен патент Республики Беларусь [19].

В таблицах 1 [13] и 2 дано сравнение одного из лучших зарубежных чугунов (марки ADI) и чугуна марки ВЧТГ по статическим характеристикам механических свойств — пределу прочности и относительному удлинению при растяжении. Видно, что разработанный чугун имеет важное преимущество перед чугуном ADI: он не теряет (катастрофически) пластичность именно в высокопрочном состоянии, когда $\sigma_b > 1200$ МПа.

Таблица 2 — Средние механические свойства плавок № 4 и № 8 чугуна ВЧТГ

Марка	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
ВЧТГ-1100	1100	2,5
ВЧТГ-1300	1300	2,6
ВЧТГ-1400	1400	2,8

К аналогичному выводу можно прийти, проанализировав рисунок 1. Здесь представлено сравнение основных механических свойств при растяжении чугуна и стали в высокопрочных состояниях.

Можно видеть, что чугун марки ВЧТГ соответствует мировым достижениям в области высокопрочных чугунов.

В таблице 3 дано сравнение указанных чугунов в сопоставлении со сталью по наиболее важным служебным характеристикам: пределам выносливости при контактном нагружении (трение качения) и при изгибе. Видно: 1) сопротивление контактной усталости разработанного нами чугуна практически несколько лучше, чем стали (у чугуна существенно меньше рассеяние свойств), и значительно (на ~ 35 %) превосходит свойства зарубежного чугуна по этому показателю; 2) наибольшее значение предела выносливости чугуна при изгибе несколько выше наименьшей величины такового для стали, и оно значительно лучше (на ~ 21 %), чем у зарубежного чугуна ADI.

Механические свойства разработанного высокопрочного чугуна с шаровидным графитом ВЧТГ определяются его структурным состоянием, которое регулируется соответствующей термообработкой. Из рисунков 2 и 3 следует, что реализуемая твердость бейнитного чугуна составляет 360—400 НВ.

Отметим, что при механической обработке чугуна ВЧТГ получается сливная стружка (рисунок 4), т. е. практически такая, как у стали средней прочности; это подтверждает «хорошую» пластичность разработанного чугуна.

Таблица 3 — Чугун и сталь: пределы выносливости

Материал	НВ _{min}	НВ _{max}	Предел контактной усталости, МПа		Предел выносливости при изгибе, МПа	
			P_{fmin}	P_{fmax}	σ_{-1min}	σ_{-1max}
ЧУГУН с шаровидным графитом (ISO 6336-5:2003(E))	200	300	550,0	700,0	210,0	248,0
Легированная термоупрочненная СТАЛЬ (ISO 6336-5:2003(E))	200	390	706,6	1123,1	302,6	370,6
ВЧТГ (плавка N 25)	320	360	900	1050	270	310

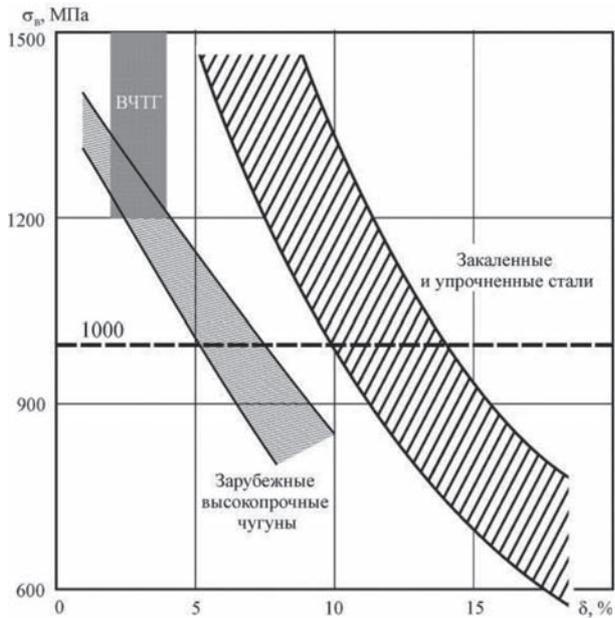
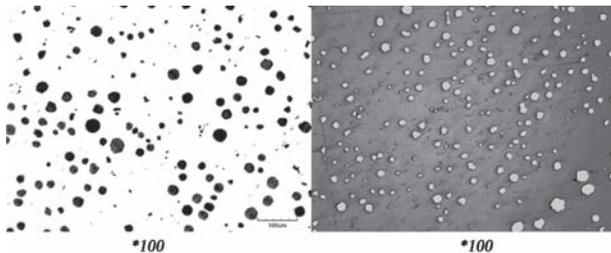
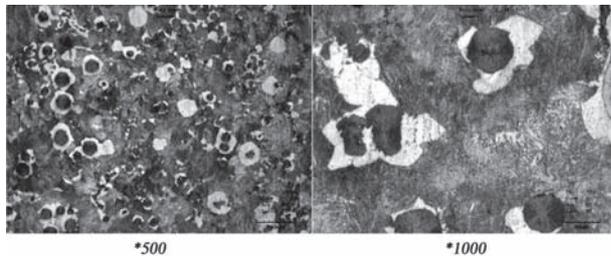


Рисунок 1 — Сравнение основных механических свойств при растяжении чугуна и стали в высокопрочных состояниях



а



б

Рисунок 2 — Структура чугуна ВЧТГ до термообработки (твердость 235—245 НВ): а — до травления; б — после травления

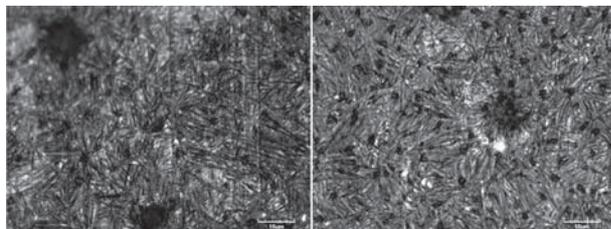


Рисунок 3 — Микроструктура чугуна ВЧТГ после термообработки на бейнит (твердость 360—400 НВ)

Зубчатые колеса. Основной целью проводимой работы в 2006—2010 годах, была разработка технологии изготовления и термообработки зубчатых колес из бейнитного чугуна с шаровидным графитом



Рисунок 4 — Стружка, образуемая при механической обработке чугуна ВЧТГ

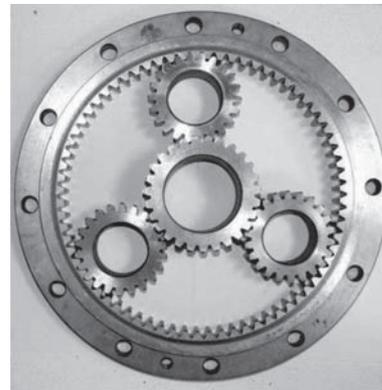


Рисунок 5 — Зубчатые колеса из ВЧТГ, для бортового редуктора УЭС 2-250

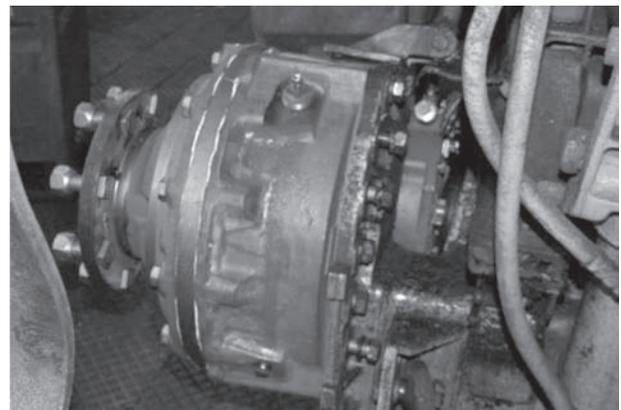


Рисунок 6 — Бортовой редуктор с эпициклической шестерней из ВЧТГ

том с целью замены крупногабаритных зубчатых колес, изготавливаемых из стальных поковок.

По результатам проведенного комплекса исследований и при авторском надзоре за технологией производства высокопрочного чугуна разработана программа и проводятся натурные испытания бортовых редукторов МК23М03 УЭС-2-250, укомплектованных зубчатыми колесами из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (рисунок 5 и 6).

Проведенные предварительные натурные испытания показали, что за 345 моточасов наработки в условиях ПО «Гомсельмаш» (УЭС-2-250, №5429) отказов вышеупомянутых шестерен не произошло. При эксплуатации в наиболее реальных условиях, реализуемых в СПК «Юбилейный» (УЭС-2-250, № 654), в течение 840 моточасов наработки отказа также не произошло. Произведенные лабораторные исследования не выявили в эксплуатирувавшихся эпициклических шестернях дефектов.

В 2011—2012 годах из чугуна марки ВЧТГ была изготовлена опытная партия крупногабаритных зубчатых колес (для бортовых редукторов) в количестве 24 шт. Семь опытных эпициклических шестерен из чугуна ВЧТГ и одна из стали 25 ХГТ были установлены в бортовые редукторы 2 комбайнов КЗС-1218 и 2 комбайнов КВК-800.

У всех 24 эпициклических шестерен проведено измерение радиального биения по диаметру, торцу и зубу (до и после термообработки). Геометрические размеры установленных шестерен измерены на измерительной машине ACCURA 10. Впоследствии, после достижения необходимой наработки, будут проведены сравнения измеренных параметров испытуемых шестерен с параметрами шестерни до испытаний.

Ножи для кормоуборочной техники. На основании результатов лабораторных исследований было предложено использовать высокопрочный чугун

ВЧТГ для изготовления ножей режущих барабанов кормоуборочных комбайнов.

Данные исследования проводятся в рамках выполнения задания 2.2.10 «Разработка технологии производства высокопрочного чугуна с особыми свойствами для тяжело нагруженных компонентов общемашиностроительного и транспортного применения. Разработка научных принципов и технологий электромагнитного количественного селективного контроля структурных параметров отливок из серого, ковкого и высокопрочного чугунов» ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия» на 2011—2015 гг.

В 2010—2011 годах были проведены испытания эксплуатационной стойкости ножей режущих барабанов кормоуборочных комбайнов КВК-800 из чугуна ВЧТГ и импортных ножей, изготавливаемых из высокопрочной стали.

В результате было установлено, что:

1. Чугунные ножи принципиально работоспособны, по прогнозу могут обеспечить годовую наработку 30 000 т. Фактическая их эксплуатационная наработка это подтвердила.
2. Ножи из чугуна вполне конкурентоспособны (особенно учитывая, что их стоимость в несколько раз ниже импортных).

В целом работа комбайнов с ножами из чугуна ВЧТГ характеризуется положительно. Фото некото-

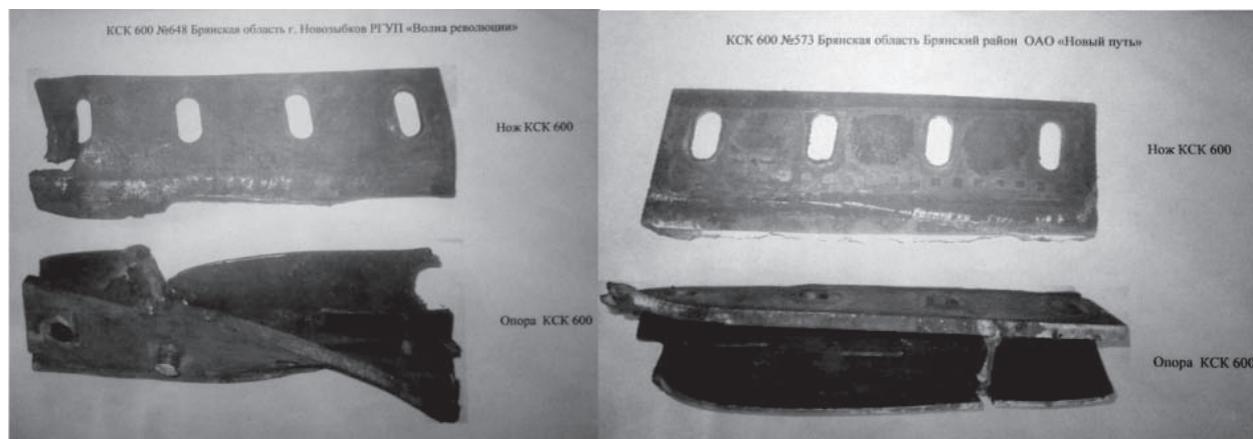


Рисунок 7 — Разрушения стальных элементов режущего барабана кормоуборочного комбайна КСК-600

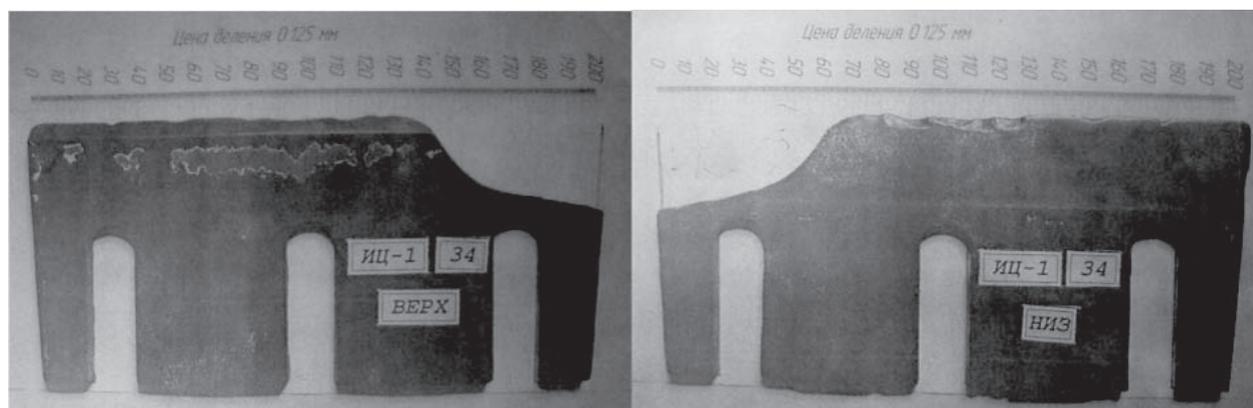


Рисунок 8 — Разрушения ножей, изготовленных из чугуна ВЧТГ, кормоуборочного комбайна КВК-800

рых разрушенных стальных элементов режущего барабана кормоуборочных комбайнов приведены на рисунке 7 а, фото наиболее характерных поврежденных и разрушенных ножей приведены на рисунке 8. Видно, что характер повреждений чугунных ножей носит локальный характер, в то время как стальные ножи в результате единичного повреждения изгибаются, что в конечном итоге приводит к повреждению других деталей измельчающе-питающего аппарата.

По результатам проведенных краш-тестов и полевых испытаний сделан предварительный вывод о возможности применения ножей из чугуна марки ВЧТГ для комплектации режущих барабанов КВК-800. ПО «Гомсельмаш» в соответствии с протоколом № 172 (29.02.2012 г.) технического совещания по вопросам изготовления ножей, противорежущих брусьев и крупногабаритных зубчатых колес из высокопрочного чугуна марки ВЧТГ в 2012 г. организовало опытно-серийное производство ножей из чугуна ВЧТГ для самоходных кормоуборочных комбайнов этой серии.

Противорежущие брусья. Рельсы. В последнее время сделано предложение [1, 6] о перспективности изготовления рельсов из специального высокопрочного чугуна марки ВЧТГ (рисунок 9), созданного специалистами ООО «НПО ТРИБОФАТИКА»



Рисунок 9 — Первый в мире рельс Р65 из высокопрочного чугуна марки ВЧТГ (плавка выполнена 25 сентября 2008 г., рельс разрезан на темплеты для исследований)

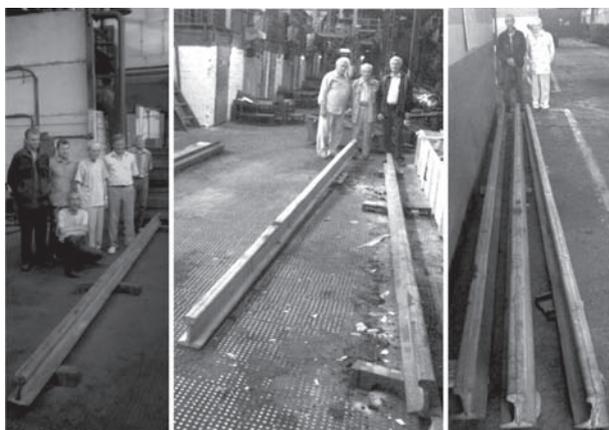


Рисунок 10 — Первые чугунные рельсы длиной 6,5 м

и ПО «Гомсельмаш». Чугун имеет и другие важные достоинства: повышенную износостойкость, самосмазываемость, способность эффективно рассеивать энергию удара; к тому же энергетические затраты на производство чугуна, по оценке американских специалистов, до 50 % ниже стали. К настоящему времени изготовлены рельсы из чугуна длиной 6,5 м (рисунок 10), которые предназначены для натурных испытаний. Работы в этой области нам представляются актуальным.

На рисунке 11 представлен эскиз установки для непрерывной отливки одновременно двух чугунных рельсов длиной 12,5 или 25 м. Общая масса опытной установки ~ 350 тонн; мощность оборудования ~ 150 кВт, производительность ~ 50 м рельсов в час. В перспективе планируется, что технологический процесс литья рельсов будет заканчиваться автоматизированной сборкой путевой рельсошпальной решетки. При этом предусмотрен вариант центробежного литья, что обеспечивает повышение всех физико-механических свойств материала. Особый интерес представляет возможность дифференциального формирования головки рельса: возможно, по предварительной проработке, за счет перераспределения специальных модификаторов, формировать головку рельса с существенно различающимися свойствами на дорожке качения и по боковой поверхности. Наконец, технология литья позволяет изготавливать рельсы с заданными радиусами кривизны в плане, при этом исключаются так называемые «концевые эффекты».

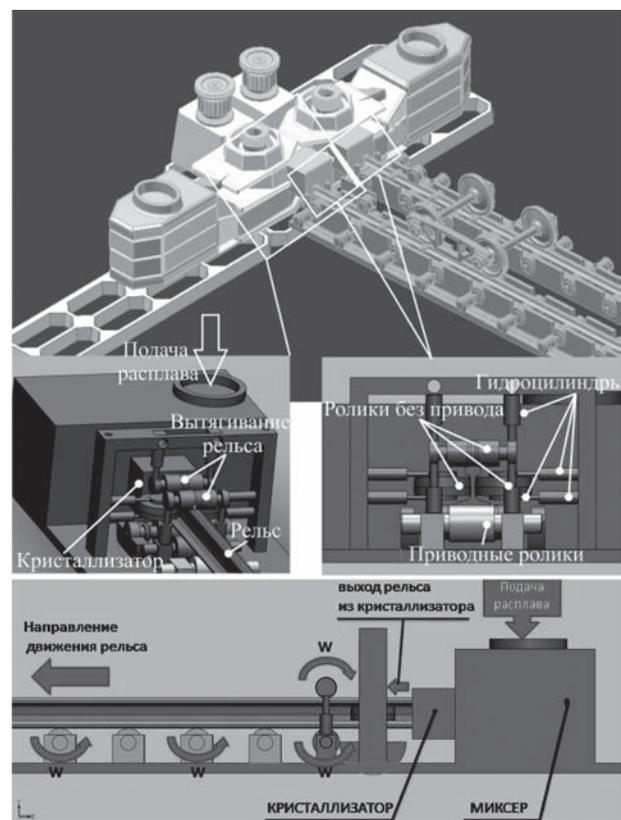


Рисунок 11 — Схема установки для непрерывной отливки чугунных рельсов

Будущее покажет, насколько реалистичны эти идеи, но их полезность, будь они реализованы, представляются несомненной и высокой.

Заключение. Полученный высокопрочный чугун марки ВЧТГ является перспективным для изготовления большой номенклатуры изделий, особенно крупногабаритных, поскольку обеспечиваются приемлемые служебные свойства, которые хорошо регулируются путем соответствующего подбора режимов термообработки.

Список литературы

1. Микрюков, В.М. Применение бейнитного высокопрочного чугуна / В.М. Микрюков, О.А. Сазонов // *Металлург* / под ред. Н.Н. Александрова [и др.]. — М., 2004. — С. 260—262.
2. Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом и аустенитно-бейнитной матрицей. Современные материалы для литых деталей / Н.Н. Александров [и др.]. — М.: *Металлург*, 2004. — 419 с.
3. Беликов, А.И. Отливки из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / А.И. Беликов, Л.А. Жуков, Д.Н. Маццарелли. — М.: *Машиностроение*, 2006. — 448 с.
4. Шебашинов, М.П. Высокопрочный чугун в машиностроении / М.П. Шебашинов. — М.: *Машиностроение*, 1988. — 216 с.
5. Железнодорожные рельсы из высокопрочного чугуна. Постановка проблемы / Л.А. Сосновский [и др.] // *Комплексная система содержания инфраструктуры ОАО «РЖД»: материалы науч.-практ. конф.*, Москва, 28 окт. 2009 г. — М., 2009. — С. 74—78.
6. Витязь, П.А. От науки к образованию и производству / П.А. Витязь // *Наука и инновации*. — 2010. — № 9(91). — С. 12—16.
7. Корниенко, Э.Н. Разработка высокопрочных чугунов с повышенными специальными свойствами / Э.Н. Корниенко, М.С. Колесников. — *Набережные Челны: КамПИ*, 1999. — 293 с.
8. Зборщик, А.М. Доменный чугун с шаровидным графитом для крупных отливок / А.М. Зборщик, И.П. Бычков. — М.: *Машиностроение*, 1995. — 128 с.
9. Корниенко, Э.Н. Перспективы производства отливок ЧШГ аустенитно-бейнитного класса / Э.Н. Корниенко, А.Г. Панов, Д.Ф. Хальфин. — *Елабуга: ООО «НЭК»*, 2001. — 213 с.
10. Беляков, А.И. Влияние термообработки на свойства ЧШГ / А.И. Беляков [и др.] // *Литейное производство*. — 1998. — № 12. — С. 29—31.
11. Косников, Г.А. Влияние условий изотермической закалки на структуру и свойства ЧШГ / Г.А. Косников, Л.М. Морозова, Н.И. Бех // *Литейное производство*. — 1998. — № 12. — С. 27—29.
12. Щеголюк, Н.И. Сравнительные исследования конструкционной прочности чугуна и стали / Н.И. Щеголюк // *Литейное производство*. — 1993. — № 9. — С. 6—8.
13. Roedter, H. ADI — Austempered Ductile Iron / H. Roedter / *Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом и аустенитно-бейнитной матрицей. Современные материалы для литых деталей: инф. сб. технич. материалов* // *Металлург* / под ред. Н.Н. Александрова [и др.]. — М., 2004. — С. 249—258.
14. Трошенко, В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справ. в 2 т. / В.Т. Трошенко, Л.А. Сосновский. — *Киев: Наук. думка*, 1987. — Т. 1. — 510 с.; Т. 2. — 825 с.
15. Неделько, Л.А. Бейнитный чугун с шаровидным графитом (БЧШГ). Структура, свойства / Л.А. Неделько, А.В. Шестаков, В.И. Шмидт // *Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом и аустенитно-бейнитной матрицей. Современные материалы для литых деталей: инф. сб. технич. материалов* // *Металлург* / под ред. Н.Н. Александрова [и др.]. — М., 2004. — С. 246—248.
16. Цитович, И.С. Трансмиссии автомобилей / И.С. Цитович, И.В. Каноник, В.А. Вавуло. — *Минск: Наука и техника*, 1979. — 256 с.
17. Жмайлик, В.А. Специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом как конкурент упрочненной стали / В.А. Жмайлик [и др.] / *Тр. VI-го Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2010)*, 25 окт. — 1 нояб. 2010 г., Минск / *Редкол.: М.А. Журавков (пред.)* [и др.]. — *Минск: БГУ*, 2010. — Т. 2. — С. 73—77.
18. Замятнин, В.О. Структура и свойства специального высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / В.О. Замятнин [и др.] / *Тр. VI-го Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2010)*, 25 окт. — 1 нояб. 2010 г., Минск / *Редкол.: М.А. Журавков (пред.)* [и др.]. — *Минск: БГУ*, 2010. — Т. 2. — С. 79—84.
19. 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; заяв. РУП «Гомсельмаш», ООО «НПО ТРИБОФАТИКА». — № а20101428; заявл. 04.10.10; опубл. 30.04.12. — 2012. — 4 с.

Psyrvkov N.V.

Special high-strength cast iron with spherical graphite as a new constructional material

The main results of research on the production of special high-strength cast iron (brand VCHTG) with high mechanical properties are presented. Preproduction series were produced from cast iron VCHTG for large gears on final drive for energy resources UES-2-250. Now they are on full-scale tests. From 2012, all forage harvesters KVK-800 are equipped with knives made of cast iron of this brand. This allows to provide almost the same operating time with the steel knives, to avoid catastrophic disruption throughout shredding and feeding system in contact with foreign objects. It is shown that from this cast iron possible make the counter boards for forage harvesters KVK-800 and KSK-600.

Поступила в редакцию 14.08.2012.