

14. ГОСТ 27674-88: Трение, износ и смазка. Термины и определения.
15. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
16. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.
17. ГОСТ 16504-81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.
18. ГОСТ 23207-78. Сопrotивление усталости. Основные термины, определения и обозначения.
19. *Холодилов О. В., Пилипович Т. П., Петроковец М. И.* Русско-белорусско-английский толковый словарь в области трения, изнашивания и смазки. – Гомель : ИНФОТРИ-БО, 1996.
20. ГОСТ 5272-68. Коррозия металлов. Термины.
21. РД 50-672-88. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Классификация видов изломов металлов.
22. ГОСТ 30638-99. Трибофатика. Термины и определения.
23. *Солитерман Ю. Л.* Прогнозирование долговечности и выбор рациональных параметров конических передач с круговыми зубьями : дис. ... канд. техн. наук. – Минск : ИНДМАШ АН БССР, 1986.
24. *Тескер Е. И.* О расчете поверхностно-упрочненных зубчатых колес на контактную прочность при действии максимальной нагрузки // Вестник машиностроения. – 1987. – № 3. – С. 14–19.
25. *Тескер Е. И., Матлин М. М.* Критерии предельных состояний при контактном нагружении деталей трансмиссий и приводов. – М. : ООО «Издательство Машиностроение-1», 2006.
26. ISO 10825-1995: International Standard. Gears. Wear and Damage to Gear Teeth. Terminology.
27. ANSI/AGMA 1010-E95: American National Standard. Appearance of Gear Teeth. Terminology of Wear and Failure.
28. DIN 3979:1979: Zahnschaden an Zahnradgetriebe Bezeichnung, Merkmale, Ursachen.
29. ZFN 201: Zahnschaden Begriffsbestimmung. Bezeichnungen und Ursachen Konzernnorm, Herausgeber. Published by Zahnradfabrik Freidrichshafen AG. Zentrale Technik Normalteilung, 1990.
30. *Errichello R.* Gear Failure Analysis: a Textbook for the Gear Failure Analysis, Townsend: Geartech, 2000.
31. *Солитерман Ю. Л.* Указ. соч.
32. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность.
33. ISO 6336:1996(E). Calculation of load capacity of spur and helical gears.
34. DIN 3990:1987. Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern.
35. ISO 10300:2001(E). Calculation of load capacity of bevel gears.
36. DIN 3991:1988. Tragfähigkeitsberechnung von Kegelrädern ohne Achsversetzung.
37. ISO/TR 13989:2000. Calculation of scuffing load capacity of cylindrical, bevel and hypoid gears
38. *Старжинский В. Е., Солитерман Ю. Л., Тескер Е. И., Гоман А. М., Осипенко С. А.* Формы повреждений зубчатых колес. Типология и рекомендации по предотвращению // Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 5. – С. 465–482.
39. *Satrzhinsky V. E., Soliterman Yu. L., Goman A. M., Osipenko S. A.* Forms of Damage to Gear Wheels: Typology and Recommendations on Prevention // Journal of Friction and Wear. – 2008. – Vol. 29, No. 5. – Pp. 465–482.
40. СТБ 1251-2000. Цилиндрические зубчатые колеса. Методы проектирования технологических процессов изготовления. (Стандарт Беларуси). – Минск : Госстандарт, 2001. – 115 с.

Получено 18.05.2017

УДК 621.833:539.4

DOI 10.22213/2413-1172-2017-2-107-112

В. В. Комиссаров, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель
Е. С. Таранова, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель
П. С. Дробышевский, ОАО «Гомсельмаш»
В. О. Замятнин, ОАО «Гомсельмаш»
С. А. Тюрин, кандидат технических наук, ОАО «Гомсельмаш»
Л. А. Сосновский, доктор технических наук, профессор, ООО «НПО Трибофатика», Гомель

ОБ ОПЫТЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ИЗ НОВОГО КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА «МОНИКА»

Введение

В настоящее время на ОАО «Гомсельмаш» большинство зубчатых колес для сельскохозяйственных машин изготавливаются из поковок стали 25ХГТ или 18ХГТ, технологический процесс производства которых достаточно сложен. Это обусловлено необходимостью получения высоких физико-механических свойств материала деталей, работающих в условиях больших динамических и контактных нагрузок. Кроме того, к материалу шестерен предъявляются высокие требования по износостойкости, демпфирующей способности и другим свойствам [1, 2].

Высокопрочный чугу́н с шаровидным графитом давно и широко применяется для изготовления ряда машиностроительных деталей ввиду известных специфических свойств. В редукторостроении зубчатые колеса из специальных чугунов заполняют пробел между закаливаемыми и цементируемыми сталями по такому важному показателю, как контактная усталостная прочность [3–5].

По результатам теоретических и лабораторных исследований, а также промышленных экспериментов был получен высокопрочный чугу́н с шаровидным графитом марки ВЧТГ (высокопрочный чугу́н фирмы «Трибофатика» (Т) и завода «Гомсельмаш»

(Г), который имеет особые механические свойства, регулируемые термообработкой: предел прочности при растяжении $\approx 900 \dots 1400$ МПа; относительное удлинение при разрыве $\approx 1,5 \dots 3,5$ % (в отдельных состояниях до 5-6 %); твердость до 55 HRC. Резуль-

таты испытаний обобщены на представленных диаграммах (рис. 1, 2). Там же представлены свойства лучших зарубежных аналогов. Видно, что в отмеченных зонах свойства чугуна ВЧТГ значительно выше зарубежных аналогов.

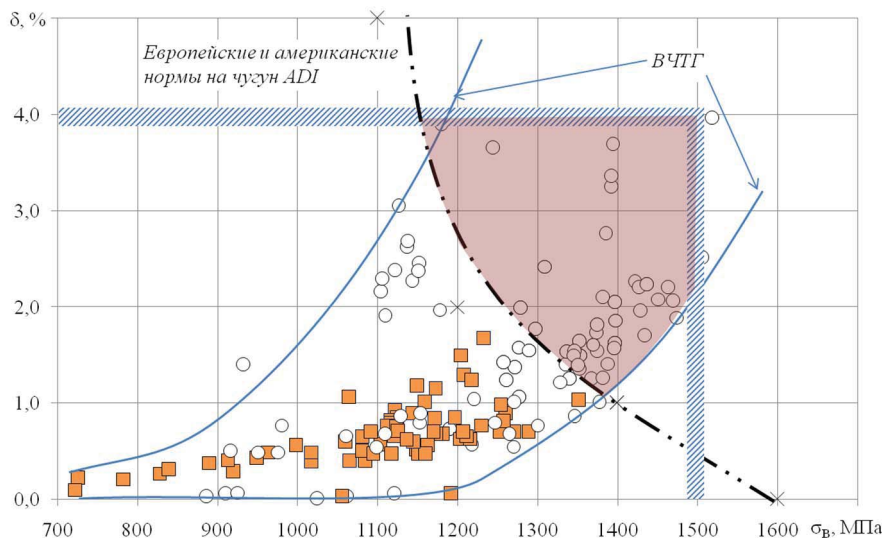


Рис. 1. Обобщенная диаграмма «пластичность – прочность» для многих плавок чугуна ВЧТГ в сравнении с зарубежным чугуном ADI

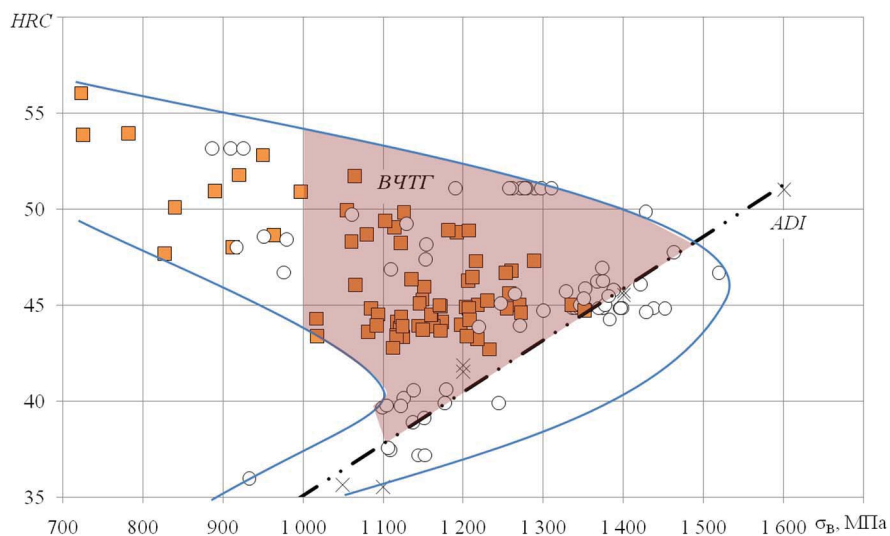


Рис. 2. Обобщенная диаграмма «твердость – прочность» для многих плавок чугуна ВЧТГ в сравнении с зарубежным чугуном ADI

Главная особенность полученного чугуна состоит в том, что его характеристики сопротивления усталости практически достигают таковых для высокопрочной легированной стали. На данный чугун получен патент РФ № 15617 [6–8].

По результатам проведенного комплекса исследований и при авторском надзоре за технологией производства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧТГ была разработана программа и реализован комплекс лабораторных и натурных испытаний эпициклических шестерен бортовых редукторов МК-23.М03 на базе энергетического средства

УЭС-2-250, комплекса высокопроизводительного кормоуборочного КВК-800 и комбайна зерноуборочного самоходного КЗС-1218. В статье представлены результаты проведенных лабораторных и натурных испытаний шестерен.

Материалы и технология

Под авторским надзором специалистов ЛИИ ОАО «Гомсельмаш» была разработана и отлажена технология производства из высокопрочного чугуна марки ВЧТГ крупногабаритных колес для сельскохозяйственной техники производства ОАО «Гомсельмаш». В соответствии с проведенным экономиче-

ским расчетом, стоимость получаемых в индивидуальном производстве крупногабаритных зубчатых колес из чугуна ВЧТГ на 20 % ниже по сравнению с серийными.

Термообработку шестерен и образцов проводили в два этапа. На первом этапе их нагревали до 880-890 °С и выдерживали в течение заданного времени до полного превращения металлической основы в однородный аустенит. На втором этапе заготовки – быстро извлекали и помещали в закалочную ванну с температурой охлаждающего реагента (соли натрия) выше температуры мартенситного превращения (250-350 °С). После выдержки в ванне и охлаждения на воздухе заготовки приобретали необходимые свойства. Микроструктура чугуна ВЧТГ до термообработки была перлитоферритная (П70/Ф30) при твердости 240-250 НВ (рис. 3, а и б). После термообработки – верхний бейнит, малое количество нижнего бейнита, остаточный аустенит при твердости 42-45 HRC (рис. 3, в и г).

Методы испытаний

Исследования механических и трибологических свойств чугуна марки ВЧТГ проводили в лаборато-

рии износоусталостных испытаний (ЛИИ) ОАО «Гомсельмаш», входящей в состав межведомственной лаборатории «Трибофатика», а также в других подразделениях завода.

Испытания по определению предела прочности и удлинения при растяжении производили на универсальной сервогидравлической машине LFV-100.1 фирмы Walter + Bai AG (Швейцария) (по ГОСТ 1497-84), измерение твердости – на универсальном твердомере Duramin-500 (по ГОСТ 9012-59 и ГОСТ 9013-59).

Испытания по определению пределов механической и контактной выносливости чугуна ВЧТГ проводили на полнокомплектной машине для износоусталостных испытаний СИ-03М (ГОСТ 30755-2001).

Перед установкой геометрические параметры зубчатого колеса проверяли на измерительной машине ACCURA 10 (с точностью до ±1 мкм). Измерение основных параметров шестерни (рис. 4, а) вели по следующим позициям: толщина зуба (рис. 4, б), ширина впадины (рис. 4, в), профиль зуба по эвольвенте и длине (рис. 4, г), диаметр и биение выступов зубьев, диаметр и биение посадочных мест.

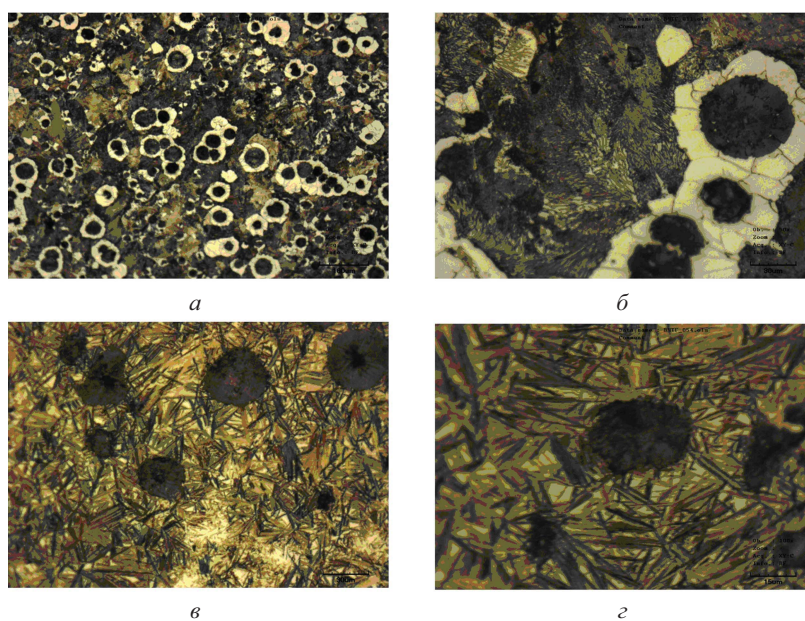


Рис. 3. Микроструктура чугуна ВЧТГ до (×100 (а), ×500 (б)) и после (×1500 (в), ×1000 (г)) термообработки

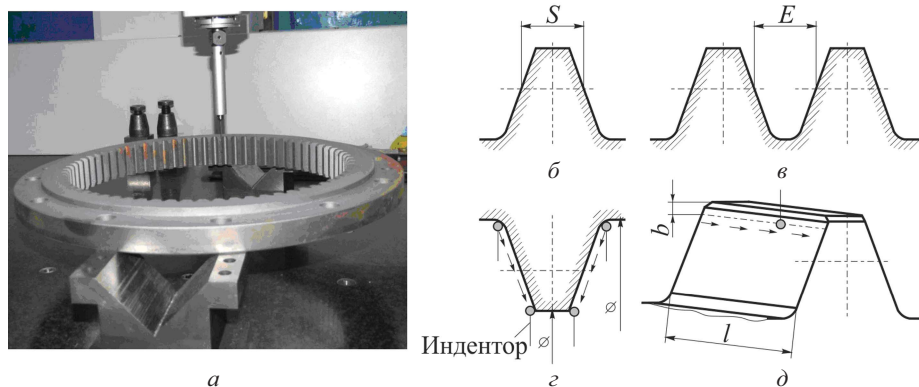


Рис. 4. Способ (а) и схемы измерения (б, в, г, д) параметров шестерни

Результаты расчетной оценки ресурса шестерен из чугуна марки ВЧТГ

Циклограмма нагружения бортового редуктора, полученная на основе типовой методики обработки результатов энергооценки сельскохозяйственной техники, дополнительно включающая кратковременные режимы перегрузки для оценки возможности малоцикловых и статических разрушений, представлена на рис. 5.

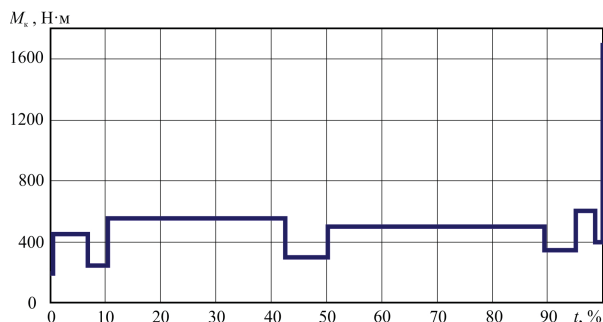


Рис. 5. Циклограмма нагружения бортового редуктора

Бортовой редуктор является планетарным, ведущее звено в нем – солнечная шестерня z_a , остановленное – эпицикл (эпициклическая шестерня МК23М03.661) z_b , ведомое – водило h , соединенное со ступицей ведущего колеса; число сателлитов $z_g n_p = 3$. Зубчатые колеса редуктора цилиндрические прямозубые. При проведении расчетов принимали, что стандартный материал зубчатых колес – сталь 18ХГТ с химико-термической обработкой до поверхностной твердости 56...64 HRCэ, а материал экспериментальных зубчатых колес – чугун ВЧТГ. Проведенные исследования механических свойств чугуна ВЧТГ показали, что $[\sigma_{-1}] = 240$ МПа, $[p_f] = 1180$ МПа, $\sigma_B = 1000...1300$ МПа, $\delta = 1-2\%$, HRC 45-47.

Для эпицикла z_b величины напряжений определяли по условиям внешнего зацепления с сателлитами. Расчеты действующих в эпицикле контактных и изгибных напряжений выполнены по методике И. С. Цитовича [9] (ГНУ ОИМ НАН Б).

Результаты расчета представлены в виде зависимости напряжений от номера ступени и длительности нагружения с указанием величин предельных напряжений (рис. 6, 7).

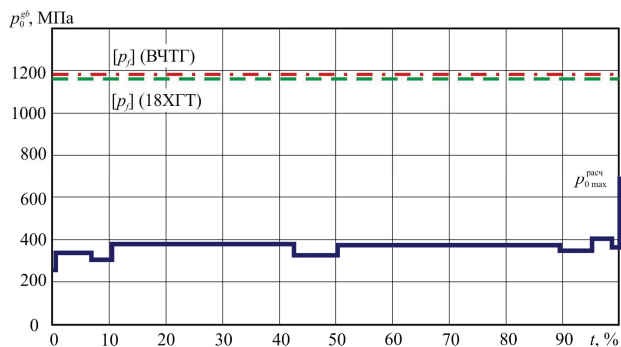


Рис. 6. Зависимость максимального контактного напряжения в сателлите и эпицикле от ступени нагружения

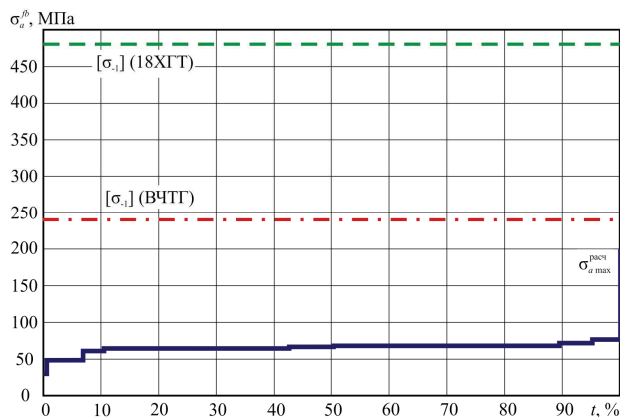


Рис. 7. Зависимость изгибающих напряжений в эпицикле от степени нагружения

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что напряжения (как контактные, так и изгибные) в процессе эксплуатации не превышают предельных величин (даже при кратковременных перегрузках).

Полученные данные позволяют установить:

- 1) по критерию контактной усталости сталь и чугун обеспечивают практически одинаковый запас прочности (n изменяется от 1,36 до 4,64 в зависимости от условий эксплуатации);
- 2) по критерию механической усталости коэффициент запаса прочности стали (n изменяется от 2,38 до 18,91 в зависимости от условий эксплуатации) выше аналогичного коэффициента для высокопрочного чугуна; однако в случае применения чугуна ВЧТГ даже его минимальное значение равно 1,2 (n изменяется от 1,2 до 9,45 в зависимости от условий эксплуатации).

Оценка ресурса показала, что срок службы бортового редуктора с эпициклом, изготовленным из высокопрочного чугуна, практически не ограничен.

Проведение натурных испытаний

Пробные эксплуатационные испытания бортовых редукторов МК-23М.03 проведены на базе энергетического средства УЭС-2-250 в условиях ОАО «Гомсельмаш». Было установлено, что за 345 моточасов отказов вышеупомянутых шестерен не произошло. Проведенные испытания показали, что шестерни из чугуна ВЧТГ в составе бортовых редукторов принципиально работоспособны.

В опытную эксплуатацию было запущено 11 бортовых редукторов (в составе 6 машин КВК-800 и КЗС-1218), укомплектованных зубчатыми колесами из чугуна марки ВЧТГ. С целью сравнительного эксплуатационного исследования на одну из машин одновременно были установлены чугунная (левый бортовой редуктор, рис. 8, а) и стальная (правый, рис. 8, б) шестерни. После наработки 444 моточаса (1 сезон) экспериментальные редуктора были сняты для анализа. Обнаружено, что в условиях эксплуатации шестерня из чугуна ВЧТГ была повреждена в меньшей степени, чем стальная (рис. 8, в и г), о чем также свидетельствуют лабораторные исследования отработанной в редукторах смазки (таблица на рис. 8).

При этом значительная часть стальных зубьев повреждена ямками выкрашивания, которые в отдельных случаях достигают длины до 2-3 мм и глубины до 1 мм; некоторые из них сливаются, образуя сплошные зоны повреждения (рис. 8, з). Это свиде-

тельствует о начале прогрессирующего выкрашивания. А на рабочих поверхностях только некоторых чугунных зубьев наблюдаются локальные ямки выкрашивания около 1 мм в диаметре, что соответствует начальному выкрашиванию (рис. 8, в).

Комплекс высокопроизводительный кормоуборочный КВК-800 (№ 751)



Результаты исследования нового и отработанного смазочного материала

Характеристика	До эксплуатации		После эксплуатации		Сравнение отработанных масел
	Новое масло	Чугунная шестерня	Стальная шестерня		
Содержание мех. примесей	0,006 (отс)	0,22	0,63		в 3,5 раза меньше в редукторе с чугунной шестерней

Рис. 8. Общий вид комбайна КВК 800 (№751) и эксплуатационные повреждения зубьев колес из чугуна (а, в) и стали (б, з)

Анализ степени поврежденности поверхностей также показал, что в отличие от чугунной шестерни у стальной наблюдаются следы пластической деформации кромки зуба – происходит выдавливание материала за пределы контактной рабочей поверхности (рис. 8, в и з).

Исследования отработанных масел из рассматриваемых редукторов показали (см. таблицу на рис. 8), что у масла из редуктора с чугунной шестерней после наработки число механических примесей в 3,5 раза меньше в сравнении с маслом из редуктора со сталь-

ной шестерней, что также косвенно свидетельствует о меньшей степени поврежденности рабочей поверхности зубьев чугунной шестерни.

По работоспособности бортовых редукторов с чугунными шестернями остальных экспериментальных машин нареканий не имелось; посторонних шумов в редукторах за время их эксплуатации не отмечено.

Выводы

1. Натурные испытания бортовых редукторов самоходных сельскохозяйственных комбайнов КВК-800 и КЗС-1218, укомплектованных зубчатыми колесами

из чугуна ВЧТГ, показали, что эпициклические шестерни из высокопрочного чугуна принципиально работоспособны: недопустимых дефектов и трещин после эксплуатации не обнаруживается. Показано, что в одинаковых эксплуатационных условиях поверхности шестерен из нового материала «Моника» повреждены в меньшей степени, чем стальные.

2. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом является перспективным для изготовления зубчатых колес номенклатуры ОАО «Гомсельмаш», особенно крупногабаритных, поскольку обеспечиваются приемлемые служебные свойства, которые хорошо регулируются путем соответствующего подбора режимов термообработки.

3. По данным плано-экономического управления ОАО «Гомсельмаш», стоимость получаемых в индивидуальном производстве крупногабаритных зубчатых колес из чугуна ВЧТГ на 20 % ниже по сравнению с серийными стальными.

Библиографические ссылки

1. Цитович И. С., Каноник И. В., Вавуло В. А. Трансмиссии автомобилей. – Минск : Наука и техника, 1979. – 256 с.
2. Шебашинов М. П. Высокопрочный чугун в машиностроении. – М. : Машиностроение, 1988. – 216 с.

Получено 02.06.2017

3. Там же.
4. 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. сборник тех. материалов / под ред. Н. Н. Александрова [и др.]. – М. : Metallurg, 2004. – С. 260–262.
5. Беликов А. И., Жуков Л. А., Маццарелли Д. Н. Отливки из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. – М. : Машиностроение, 2006. – 448 с.
6. Специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом как конкурент упрочненной стали / В. А. Жмайлик [и др.] // Тр. VI Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 октября – 1 ноября 2010 г., Минск (Беларусь). – Минск : БГУ, 2010. – Т. 2. – С. 73–77.
7. Структура и свойства специального высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / В. О. Замятнин [и др.] // Тр. VI Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 октября – 1 ноября 2010 г., Минск (Беларусь). – Минск : БГУ, 2010. – Т. 2. – С. 79–84.
8. Пат. 15617 Респ. Беларусь, МПК С 22С37/04. Чугун с шаровидным графитом и высоким сопротивлением усталости / Л. А. Сосновский, В. А. Жмайлик, Н. В. Псырков, В. О. Замятнин, В. В. Комиссаров ; заявители РУП «Гомсельмаш», ООО «НПО Трибофатика». – № а20101428 ; заявл. 04.10.2010 ; опубл. 30.04.2012. – 4 с.
9. Цитович И. С., Каноник И. В., Вавуло В. А. Указ. соч.

УДК 621.822

DOI 10.22213/2413-1172-2017-2-112-117

В. И. Гольдфарб, доктор технических наук, профессор, Институт механики ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
Е. С. Трубочев, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
Е. В. Харанжевский, доктор технических наук, Удмуртский государственный университет, Ижевск
А. Г. Ипатов, кандидат технических наук, Ижевская государственная сельскохозяйственная академия
К. В. Богданов, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
Ю. Ю. Матвеева, АО «ИЭМЗ «КУПОЛ»

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НИЗКОСКОРОСТНЫХ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ОПОР СКОЛЬЖЕНИЯ

Введение

Как показала практика производства низкоскоростных тяжело нагруженных спиральных редукторов трубопроводной арматуры (ТПА) [1], в вечном вопросе совершенствования опор валов имеются резервы как с эксплуатационной, так и с технологической точек зрения. В трех поколениях конструкций этих редукторов [2] применялись разные варианты решений этого вопроса:

– опоры скольжения «сталь – чугун» (вал по корпусу, как это реализовано во многих «бюджетных» импортных редукторах [3], де-факто занимающих до половины отечественного рынка этой техники);

– подшипники качения, применение которых позволило обеспечить повышенную надежность и КПД редукторов, но вместе с тем обусловило появление ряда компоновочных ограничений и возрастание себестоимости редукторов (что связано с дефицитом

некоторых, удобных для компоновки, серий подшипников из-за падения отечественной подшипниковой отрасли);

– подшипники скольжения на основе металлофторопластового листа [4].

Последнее решение в целом оказалось достаточно надежным и эффективным с точки зрения обеспечения высокого КПД редуктора, дало универсализм в компоновке различных исполнений редукторов и обеспечило на первом этапе удовлетворительные экономические характеристики. Однако совершенствование редукторной техники и технологии с возрастающей остротой ставило вопрос о замещении этого решения другим, более экономичным, что в особенности стало актуальным из-за макроэкономических событий последних лет.

Эффективным способом улучшения характеристик контактных поверхностей стала их лазерная