

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕРЫХ ЧУГУНОВ

Д.А. Габец, А. М. Марков, А. В. Габец, Е. О. Чертовских

В современных условиях развития промышленности эффективным методом повышения эксплуатационной надежности серых чугунов, работающих в сложных режимах ударно-фрикционного износа, является их комплексное легирование. Применение технологии легирования позволяет добиться значительного увеличения механических свойств за счет изменения структуры и характера распределения графита в чугуне. Цель данного исследования заключается в установлении зависимостей влияния легирующих элементов на эксплуатационные свойства серого чугуна, работающего в условиях ударно-фрикционного износа. В статье рассмотрен весь комплекс механических испытаний легированного никелем и молибденом износостойкого чугуна ЧМН-34М в сравнение с базовым чугуном СЧ35, предназначенного для деталей, работающих в условиях ударно-фрикционного износа. Проведены исследования предела прочности при растяжении и сжатии, представлена микроструктура чугуна ЧМН-35 после механических испытаний на излом. Так, предел прочности разработанного износостойкого чугуна составляет от 395 МПа до 450 МПа, а твердость находится в пределах от 276 до 318 НВ. Установлено, что применение технологии легирования способствует формированию структуры с более равномерным распределением графитных включений, что способствует увеличению величины предела прочности сплава при растяжении и сжатии. Проведен анализ результатов фрактографических динамических разрушенных образцов, механизм разрушения серийного и легированного чугуна одинаков, разрушение образцов происходит по хрупкому типу с явным преобладанием межзеренного разрушения, поверхность разрушения в легированном чугуне однороднее.

Ключевые слова: Легирование чугуна, ударно-фрикционный износ, износостойкость, легирование никелем, легирование молибденом, износостойкий чугун, графит, предел прочности при сжатии.

В современных машинах и механизмах остро стоит вопрос надежности узлов, способных работать в условиях ударно-фрикционного износа. Такие изделия должны иметь высокие механические свойства способные обеспечить комплекс свойств, направленных на сопротивление при сжатии и растяжении, а также противостоять износу в сопрягаемых поверхностях. К таким изделиям можно отнести детали тележки грузового вагона, работающих в условиях интенсивных фрикционных нагрузок. В настоящее время широкая номенклатура деталей тележки может изготавливаться из серого чугуна СЧ35, который достаточно хорошо зарекомендовал себя в сложных режимах эксплуатации. Однако данный чугун имеет в своем составе большое содержание графита, который в условиях ударно-фрикционного износа может выступать в качестве концентратора зарождения трещин. Одним из перспективных материалов является серый чугун ЧМН-35М легированный никелем и молибденом (патент № 2562554), применение данного материала перспективно при изготовлении таких дета-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 2018

лей как фрикционный клин и колпак скользя на тележках модели 18-100 или ее аналогов.

Основные требования к получаемому путем легирования износостойкому чугуну – относительно низкая себестоимость за счет снижения концентрации дорогих легирующих элементов. При этом механические свойства разрабатываемого материала должны быть достаточно высокими для возможности работы в условиях ударно-фрикционного износа (временное сопротивление при растяжении: не менее 350 МПа, твердость: 250- 300 НВ). Анализ существующих технологий получения износостойких ударопрочных чугунов показал, что имеется зависимость роста механических и прочностных свойств с увеличением процентного содержания никеля и молибдена [1-3].

В качестве базового материала для исследований был выбран серый чугун СЧ35 (ГОСТ 1412-85), легированный никелем и молибденом. Отличительной особенностью данного сплава являются его высокие эксплуатационные и износостойкие свойства.

Основное применение данного чугуна изготовление литых деталей тележки грузового вагона, работающих в условиях ударно-фрикционного износа, таких как фрикционный клин и колпак скользуна.

На основе ранее полученных результатов скорректирована рецептура легирующих

элементов, разработаны технические условия (ТУ 0812-001-10036140-2014) на химический состав и механические свойства, приведенные в таблицах 1 и 2, материалу отливки присвоен индекс ЧМН-35М, а также получен патент на изобретение № 2562554 [2].

Таблица 1 - Химический состав чугуна марки ЧМН-35М

Марка Чугуна	Массовая доля элементов, % Fe – остальное								
	C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	Cu	P	S
ЧМН-35М	2,5÷2,9	1,3÷1,5	0,7÷1,0	0,6÷0,9	0,5÷0,8	≤0,3	≤0,3	≤0,2	≤0,1

Таблица 2 - Механические свойства чугуна марки ЧМН-35М

Марка Чугуна	Временное сопротивление при растяжении, МПа, не менее	Твердость по Бринеллю, НВ	
		не менее	не более
ЧМН-35М	350	250	300

Допускается превышение минимального значения временного сопротивления при растяжении не более, чем на 100 МПа (10 кгс/мм²)

Для оценки свойств разработанного материала были изготовлены образцы для исследования химического состава, структуры и механических свойств. С целью подтверждения результатов были получены заключения по химическому составу и механическим свойствам от независимых лабораторий. Образцы 1-1, 1-2, 1-3, 2-1, 2-2, 2-3 изготовлены из серого чугуна СЧ35, образцы 3-1, 3-2, 3-3, 4-1, 4-2, 4-3 изготовлены из легированного чугуна

ЧМН-35М, химический состав образцов представлен в таблице 3 [4].

В образцах 1-1, 1-2, 1-3, 2-1, 2-2, 2-3 содержание кремния меньше заданных требований согласно ГОСТ 1412-85. В образцах 4-1, 4-2, 4-3 превышено содержание углерода согласно ТУ 0812-001-10036140-2014.

Механические свойства при испытании на растяжение полностью удовлетворяют требованиям ТУ на ЧМН-35М (Таблица 4).

Таблица 3 - Химический состав образцов

№ образца	Марка чугуна	Массовая доля элементов, % Fe – остальное								
		C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	Cu	P	S
1-1	СЧ35	3,21	1,05	1,0	0,002	0,071	0,2	0,135	0,02	0,032
1-2	СЧ35	2,96	0,90	1,15	0,002	0,062	0,2	0,123	0,02	0,062
1-3	СЧ35	2,88	0,99	1,10	0,002	0,072	0,2	0,131	0,02	0,032
Среднее 1	СЧ35	3,01	0,99	1,08	0,002	0,068	0,2	0,13	0,02	0,042
2-1	СЧ35	3,13	1,03	1,12	0,002	0,069	0,2	0,134	0,03	0,033
2-2	СЧ35	3,11	1,03	1,03	0,002	0,068	0,2	0,134	0,03	0,030
2-3	СЧ35	3,06	1,06	1,09	0,002	0,071	0,2	0,137	0,03	0,031
Среднее 2	СЧ35	3,10	1,04	1,08	0,002	0,069	0,2	0,135	0,03	0,031
3-1	ЧМН-35М	2,78	1,19	0,83	0,670	0,643	0,07	0,052	0,01	0,024
3-2	ЧМН-35М	2,84	1,15	0,82	0,652	0,638	0,06	0,045	0,01	0,045
3-3	ЧМН-35М	2,76	1,13	0,81	0,644	0,635	0,05	0,050	0,01	0,022
Среднее 3	ЧМН-35М	2,79	1,16	0,82	0,655	0,639	0,06	0,049	0,01	0,030
4-1	ЧМН-35М	3,26	1,33	0,80	0,509	0,627	0,05	0,053	0,02	0,033
4-2	ЧМН-35М	3,26	1,27	0,85	0,553	0,639	0,05	0,053	0,02	0,029
4-3	ЧМН-35М	3,19	1,15	0,71	0,487	0,631	0,05	0,049	0,02	0,024
Среднее 4	ЧМН-35М	3,23	1,25	0,79	0,519	0,633	0,05	0,052	0,02	0,029

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕРЫХ ЧУГУНОВ

Таблица 4 - Полученные механические свойства чугуна марки ЧМН-35М

Марка Чугуна	Временное сопротивление при растяжении, МПа	Твердость по Бринеллю, НВ	
		от	до
ЧМН-35М	380 - 395	276	318
СЧ35	325 - 343	243	288

Для испытаний на сжатие применяют универсальные испытательные машины, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 28840. Условия, которые должны соблюдаться при испытании на сжатие, те же, что и при испытании на растяжение, но предъявляются более высокие требования к центрированию образца и отсутствию взаимного перекоса нажимных плит, передающих силу на обра-

зец.

Образцы для испытаний на сжатие готовятся по ГОСТ 25.503-97. Для исследования прочности серого чугуна СЧ35 и легированного никелем и молибденом ЧМН-35М было изготовлено по 6 шт. образцов типа I, диаметром 10 мм, и высотой 20 мм. (рисунок 1). [5-7].



Рисунок 1 – Фото образцов

Механические испытания серых чугунов на предел прочности при сжатии проводили согласно ГОСТ 25.503, на универсальной испытательной машине EU-20. Образцы типа I были выточены на токарно-винторезном станке диаметром 10 мм. и высотой 20 мм. Полученные результаты испытаний представлены в таблице 5 [8].

Испытание на сжатие проводили с применением специального приспособления, в который предотвращает перекос образца при испытании (рисунок 2). В ходе эксперимента

наблюдалось два вида разрушения образцов: полное разрушение образца 1-1 и 2-3 и наклоненное под углом 45° к оси образца (рисунок 3-4).

Предел прочности при сжатии чугуна СЧ35 в среднем равен 2911 (2564-3226) МПа, предел прочности при сжатии легированного чугуна ЧМН-35 равен 3350 (3196-3559) МПа. Таким образом, предел прочности при сжатии чугуна ЧМН-35М выше, чем стандартного чугуна СЧ35 на 13 процентов.



Рисунок 2 - Приспособление

Таблица 5 – Результаты испытаний серых чугунов

№ образца	Материал	Предел прочности, кг/см ²	Предел прочности, МПа
1-1	СЧ35	26150	2564
1-2	СЧ35	29100	2853
1-3	СЧ35	31100	3049
2-1	СЧ35	32900	3226
2-2	СЧ35	30500	2991
2-3	СЧ35	28400	2785
Среднее	СЧ35	29691 (26150-32900)	2911 (2564-3226)
3-1	ЧМН-35М	33500	3285
3-2	ЧМН-35М	32900	3226
3-3	ЧМН-35М	36300	3559
4-1	ЧМН-35М	32600	3196
4-2	ЧМН-35М	34200	3353
4-3	ЧМН-35М	35500	3481
Среднее	ЧМН-35М	34166 (32600-35500)	3350 (3196-3559)



Рисунок 3 – Чугун СЧ35 образец 1-1



Рисунок 4 – Чугун ЧМН-35М образец 3-1

Результаты исследования образцов на ударный изгиб представлены в таблице 6. Характер разрушения макрохрупкий. Из приведенных данных в таблице видно, что легированный чугун также, как и чугун марки СЧ 35, не чувствителен к концентраторам напря-

жений. Ударная вязкость образцов практически одинаковая. Это обусловлено наличием графитных включений, которые из-за низкой прочности при разрушении могут рассматриваться как микротрещины [9-10].

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕРЫХ ЧУГУНОВ

Таблица 6 - Результаты испытаний на ударный изгиб

№	Марка чугуна	Ударная вязкость KCU , Дж/см ²	Ударная вязкость KCV , Дж/см ²
1	ЧМН-35М	107-112	102-108
2	СЧ35	89-95	95-101

Исследование микроструктуры чугуна проводилось в соответствии с ГОСТ 3443 на микроскопе Nikon Eclipse MA200 методом сравнения с эталонными шкалами. Форму, размер, распределение и площадь графитных включений определяли при увеличении во 100 крат на нетравленном шлифе. Тип металлической основы чугуна и дисперсность перлита определяли после травления в 4% спиртовом растворе азотной кислоты при увеличении в 500 крат [11-12].

Распределение графитных включений в чугуне СЧ35 смешанное междендритное неравномерное (рисунок 5, а). В чугуне ЧМН-35М смешанное (равномерное и участки неравномерного) распределение графита (рисунок 5, б). Металлическая основа чугуна СЧ35 полностью перлитная (рисунок 6, а). Основные отличия легированного чугуна заключаются в структуре металлической основы: наличием перлита и феррита (рисунок 6, б) [13-14].

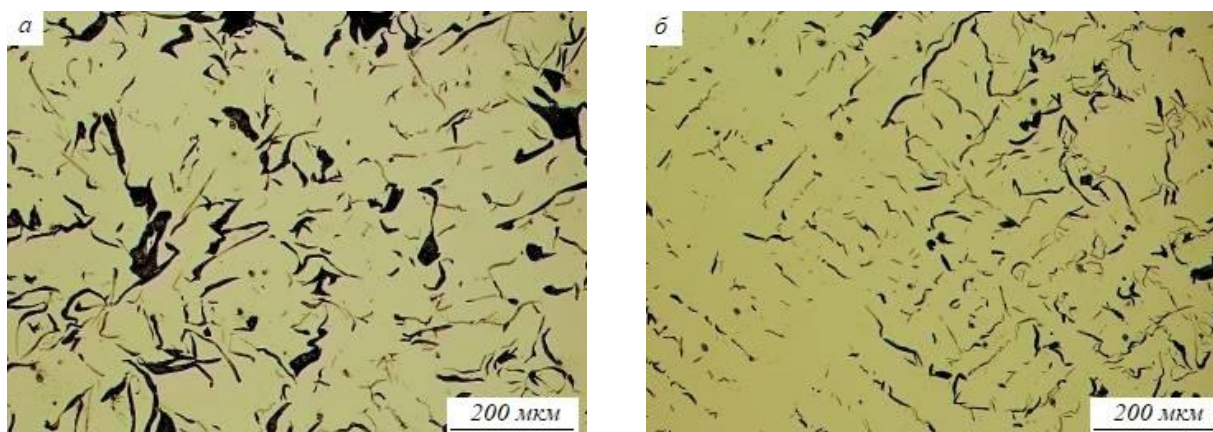


Рисунок 5 - Распределение графита: а) Смешанное и неравномерное в чугуне СЧ35; б) Смешанное в чугуне ЧМН-35М

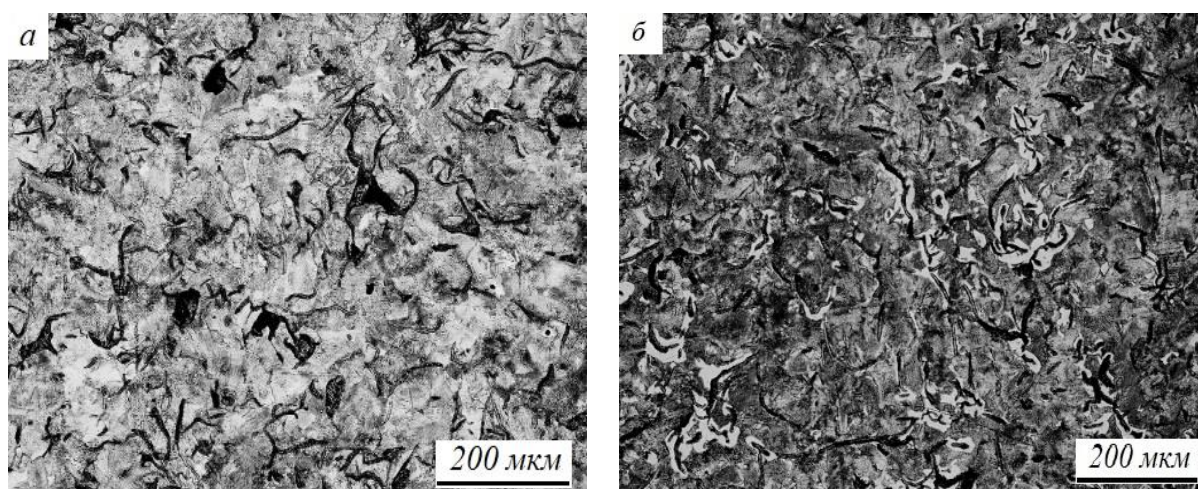


Рисунок 6 - Основа: а) Перлитная в чугуне СЧ35; б) Перлитно-ферритная в чугуне ЧМН-35М

Фрактографические исследования образцов проводили на электронном микроскопе *Carl Zeiss* при увеличениях до 1000 крат. Исследовали поверхность разрушения образцов после испытаний на предел прочности. В области излома имеются фасетки хрупкого скола. У чугуна ЧМН35-М размер фасеток примерно в 1,5 раза мельче чем у СЧ35. Механизм разрушения представлен-

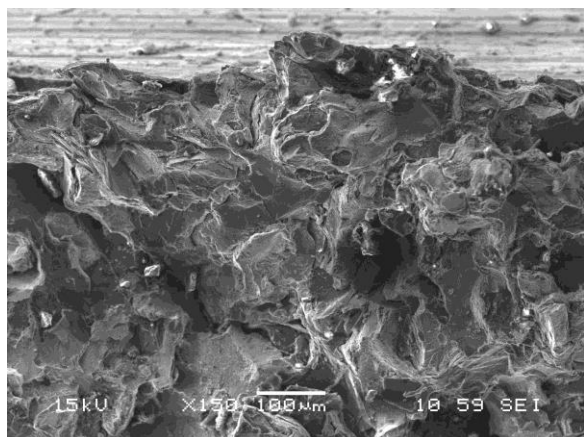


Рисунок 7 – Фрактограмма излома СЧ35 после испытаний

ных образцов практически одинаков, разрушение проходит с преобладанием межзеренного разрушения по хрупкому процессу. Преобладание межзеренного разрушения в области зарождения трещины в изломе образцов модифицированного чугуна ЧМН35-М и чугуна СЧ35 после испытаний на ударный изгиб (*KCU*) представлено на рисунке 7-8 [15].

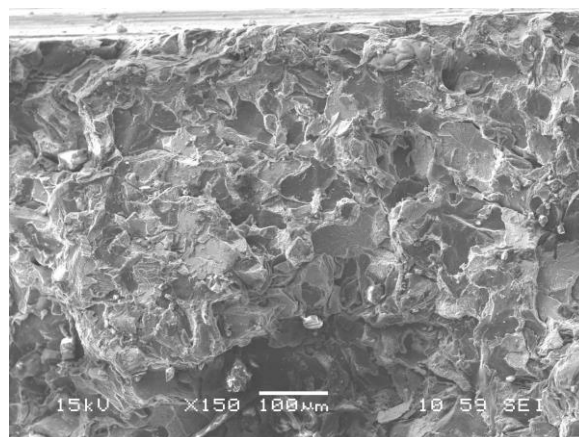


Рисунок 8 – Фрактограмма излома ЧМН-35М после испытаний

ВЫВОДЫ

1. Предел прочности при сжатии легированного никелем и молибденом чугуна ЧМН-35М выше, чем серийного СЧ35 примерно на 13 %, это связано, прежде всего, с микроструктурой чугуна, равномерно распределенными графитными включениями, а также более дисперсной металлической основой.

2. Анализ результатов фрактографических исследований динамически разрушенных образцов свидетельствует о том, что механизмы разрушения серого чугуна СЧ35 и разработанного в работе легированного износостойкого чугуна ЧМН-35М имеют одинаковый характер, как в зонах зарождения, так и в зонах распространения трещин. Разрушение образцов происходит по хрупкому типу с явным преобладанием межзеренного механизма. Поверхности разрушения образцов из ЧМН-35М более однородные, размер фасеток скола составляет от 20 мкм до 60 мкм, что примерно в 1,5 раза мельче, чем у чугуна СЧ35.

3. Предложен состав легированного чугуна ЧМН-35М повышенной износостойкости. Установлен характер распределения графитовых включений (сочетание равномерного и неравномерного распределения), и металлической основы, состоящей из перли-

та и феррита. Это способствует повышению механических свойств разработанного материала, который может быть использован для изготовления деталей, работающих в условиях ударно-фрикционного износа

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габец Д.А., Марков А.М., Габец А.В. Исследование влияния химического состава и структуры на механические свойства чугуна ЧМН-35М // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4, № 4. – С. 100-107.
2. Чугун : пат. 2562554 Рос. Федерация. – № 2014118635; заявл. 08.05.2014; опубл. 12.08.2015, Бюл. 25. – 5 с.
3. Gabets, A.V., Markov, A.M., Gabets, D.A., Komarov, P., Chertovskikh, E.O. Investigation of chemical composition and material structure influence on mechanical properties of special cast iron // MET-AL 2017 - 26th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings - ISBN: 9788087294796
4. Корниенко, Э.Н., Бикулов Р.А. Тяжелая лигатура для получения высокопрочного чугуна // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 2. – С. 3-5.
5. Габец А.В., Марков А.М., Габец Д.А., Чертовских Е.О. Управление износостойкостью ответственных узлов и деталей подвижного состава:

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕРЫХ ЧУГУНОВ

монография. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2016. – 213 с. – ISBN 978-5-7568-1188-9.

6. Коровин В.А., Леушин И.О., Палавин Р.Н., Киров А.С. Влияние модифицирования на структуру и свойства чугуна и стали для прокатных валков // Литейщик России. – 2011. – № 12. – С. 15-17.

7. Gabets, A.V., Gabets, D.A., Markov, A.M., Radchenko, M.V., Leonov, S.L.. Technological Support of Critical Parts for Railway Transport Working Properties // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. DOI: 2-s2/0-85012146259. ISBN:17551307

8. Vijeesh, V., Prabhu K.N. Review of microstructure evolution in hypereutectic AL-SI alloys and its effect on wear properties // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2014. – Vol. 67, iss 1. – Pp. 1-18. – DOI: 10.1007/s12666-013-0327-x.

9. Управление износостойкостью ответственных узлов и деталей подвижного состава: монография / Д. А. Габец [и др.]. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2016. – 213 с.

10. Гольдштейн Я. Е., Мизин В.Г. Модифицирование и микролегирование чугунов и стали. - М.: «Металлургия», 1986.

11. Габец А.В. Специальный чугун для отливки фрикционного клина тележки железнодорожного вагона // Ползуновский вестник. 2013. № 4/2. С.51-52.

12. Комаров, О.С., Розенберг Е.В., Урбанович Н.И. Особенности модифицирования различных типов железоуглеродистых сплавов // Литье и металлургия. – 2015. – № 2 (79). – С. 24-28.

13. Габец, Д.А., Марков А.М., Габец А.В. Специальный модифицированный чугун марки ЧМН-35М для тяжело нагруженных деталей тележки грузового вагона // Тяжелое машиностроение. – 2016. – № 1-2. – С. 23-26.

14. Габец, А.В., Марков А.М., Габец Д.А. Моделирование эксплуатационных свойств деталей, изготовленных из специального чугуна ЧМН-35М // Ползуновский вестник. – 2016. – № 2. – С. 36-44.

15. Борщ Б.В., Габец А.В., Сухов А.В., Филиппов Г.А. Повышение износостойкости фрикционных деталей из серого чугуна // Сталь. – 2014. – № 1. – С. 66-68.

Габец Денис Александрович, Инженер НИС, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», 656038, г. Барнаул, пр. Ленина 46, e-mail: gabets22@mail.ru.

Марков Андрей Михайлович, доктор технических наук, профессор, Профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», 656038, г. Барнаул, пр. Ленина 46, e-mail: andmarkov@inbox.ru.

Габец Александр Валерьевич, кандидат технических наук, директор по развитию ООО «СИБТрансМаш», 656012, г. Барнаул, ул. Папанинцев, д. 97. e-mail: gabe-sa@mail.ru.

Чертовских Евгений Олегович, кандидат технических наук, инженер ОГМЕТ ООО «АСЛЗ», 6560, 656037, пр. Калинина 116/52, e-mail: chertovskih13@gmail.com.