



**МЕТАСТАБИЛЬНАЯ  
СТРУКТУРА АУСТЕНИТНОГО  
МАРГАНЦОВИСТОГО СПЛАВА И  
ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ  
ДЕТАЛЕЙ НА ЕЕ ОСНОВЕ**

✉<sup>1</sup> **Попов Дмитрий Анатольевич**  
к.т.н., доцент кафедры машиностроитель-  
ных технологий Воронежского государ-  
ственного лесотехнического университета  
им. Г.Ф. Морозова (РФ)  
e-mail: [gaz.7@mail.ru](mailto:gaz.7@mail.ru)

**Хрипченко Михаил Сергеевич**  
к.т.н., доцент кафедры автомобилей и сер-  
виса Воронежского государственного ле-  
сотехнического университета им.  
Г.Ф. Морозова (РФ)

**Агарков Степан Данилович**  
студент 2 курса магистратуры  
Воронежского государственного  
лесотехнического университета им.  
Г.Ф. Морозова (РФ)

**Аннотация.** Проведены сравнительные мик-  
роструктурные исследования и механические  
испытания экспериментального аустениного  
марганцовистого сплава и типовых конструк-  
ционных материалов. В результате исследо-  
ваний выявлены относительные данные, сви-  
детельствующее о высоких механических  
свойствах экспериментального сплава, позво-  
ляющие рекомендовать его для деталей ма-  
шин, работающих при высоких нагрузочно-  
скоростных режимах эксплуатации и темпе-  
ратурном воздействии до 700 °С

**Ключевые слова:** МАРГАНЦОВИСТЫЙ  
СПЛАВ, АУСТЕНИТ, МИКРОСТРУКТУ-  
РА, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ, ЖАРОПРОЧ-  
НОСТЬ, УПРОЧНЕНИЕ

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

**METASTABLE  
STRUCTURE OF  
AUSTENITIC MANGANESE  
ALLOY AND PROSPECTS FOR  
CREATION OF PARTS BASED ON IT**

✉<sup>1</sup> **Dmitriy A. Popov**  
Cand. of Tech. Sc., associate Professor of the De-  
partment of Mechanical Engineering Technolo-  
gies, Voronezh State Forestry Engineering Uni-  
versity of G.F. Morozov, Russian Federation,  
e-mail: [gaz.7@mail.ru](mailto:gaz.7@mail.ru)

**Mikhail S. Khripchenko**  
Cand. of Tech. Sc., associate Professor of the De-  
partment of automobiles and Service, Voronezh  
State Forestry Engineering University of G.F.  
Morozov, Russian Federation,

**Stepan D. Agarkov**  
2nd year graduate student of the Department  
of Mechanical Engineering Technologies  
of the Voronezh State Forestry University  
named after G. F. Morozov (R F)

**Annotation.** Comparative microstructural stud-  
ies and mechanical tests of an experimental aus-  
tenitic manganese alloy and typical structural ma-  
terials have been carried out. As a result of the  
research, relative data have been revealed, indi-  
cating high mechanical properties of the experi-  
mental alloy, which makes it possible to recom-  
mend it for machine parts operating at high load-  
speed operating conditions and temperature ex-  
posure up to 700 °С.

**Keywords:** MANGANESE ALLOY,  
AUSTENITE, MICROSTRUCTURE,  
WEAR RESISTANCE, HEAT  
RESISTANCE, HARDENING

### **1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы**

Одной из ключевых задач развития современного машиностроения является обеспечение заданной долговечности и надежности эксплуатации машин и механизмов за счет разработки более совершенных материалов в первую очередь для деталей, работающих в экстремальных условиях, обусловленных высокими нагрузочно-скоростными режимами и температурами, возникающими в том числе в результате фрикционного разогрева, например сопряжений тормозных механизмов, узлов предназначенных для передачи или преобразования крутящего момента [1-2], а также деталей, работающих на изнашивание под воздействие высоких температур, например газораспределительного механизма ДВС.

Опыт эксплуатации автомобилей семейства ГАЗ с двигателем ЗМЗ, показал, что при переводе автомобилей на двухтопливную систему питания (газ-бензин) ресурс головки блока цилиндров снижается до 30 ... 50 тыс. км пробега т.е. 3-5 раз. Причиной отказа является низкая жаропрочность и износостойкость втулок (седел) клапанов, которые деформируются «проседают» в процессе эксплуатации и сопряжение теряет герметичность. Анализ материала, используемого для втулок, показал, что для их изготовления использовали серый перлитный чугун марок СЧ 20-25 ГОСТ 1412-85. Таким образом данный материала отвечает требованиям эксплуатации на бензине, но на газовой смеси он не обеспечивает должную работоспособность.

Тормозные колодки локомотивов изготавливаются из фосфористого чугуна по ГОСТ 30249-97, основу структуры которого составляет перлит с включениями цементита, графита, и фосфидной эвтектики. В результате анализа статистической информации, известно, что колодки, изготавливаемые из такого чугуна, имеют низкую долговечность и полностью изнашиваются на относительно небольшой дистанции, примерно 5-7 тыс. км. В результате низкой износостойкости тормозных колодок издержки железнодорожной отрасли на эксплуатацию подвижного состава существенно влияют на величину тарифов перевозки пассажиров, так как стоимость металла непрерывно возрастает, кроме этого, издержки дополняются стоимостью простоев железнодорожного транспорта на обслуживании. Немаловажное значение имеет и тот факт, что тормозные колодки, изготовленные из фосфористого чугуна, оказывают изнашивающее воздействие на рабочую поверхность цельнокатаных колесных пар. Стоимость колес несоизмерима велика по отношению к тормозным колодкам поэтому данный факт заслуживает особого внимания специалистов с целью существенного сокращения издержек на замену или восстановление рабочей поверхности колес, из-за преждевременного износа и повреждения от взаимодействия с колодками из фосфористого чугуна.

Проблема низкой стойкости по отношению износу тормозных шкивов подъемно-транспортных машин (ПТМ) известна давно [3], расходы, связанные с эксплуатацией машин, вызванные в том числе низкой их надежностью, особенно в условиях интенсивной сезонной эксплуатации существенно влияют на общую эффективность работы предприятий различных сфер деятельности. Традиционными материалами, используемыми для изготовления шкивов и тормозных барабанов являются среднеуглеродистые стали 35 Л, 40Х ГОСТ 977-88, а также серый чугун СЧ25 ГОСТ 1412-85. По разным оценкам ресурс шкивов козловых кранов, работающих в лесном хозяйстве, может достигать всего 50-80 рабочих смен, после этого требуется их замена, сопряженная с относительно длительным простоем ПТМ.

Из анализа работоспособности пар трения эксплуатирующихся, в частности, в условиях сухого трения, было отмечено, что ключевым фактором, отвечающим за работоспособность сопряжений, является структура материалов, ее способность адекватно воспринимать рабочие нагрузки и приспосабливаться к изменяющимся условиям.

Металлические сплавы на основе метастабильного аустенита известны давно [4-7], однако перспективы их использования в современном машиностроении недооценены. Благодаря сочетанию уникальных механически свойств, обеспечиваемых гетерогенной структурой сплава, а также дешевизной состава и технологий получения они могут заменить традиционные сплавы для изготовления деталей машин.

## 2 Материал и методы

Исследование физико-механических свойств экспериментального сплава [8] (табл. 1) и эталонных материалов сталь 45 ГОСТ1050-88, СЧ25 ГОСТ 1412-85. в частности, твердость измеряли методами Бринелля (ГОСТ 9012-59) и Роквелла (ГОСТ 9013-59).

Таблица 1 – Химический состав экспериментального сплава

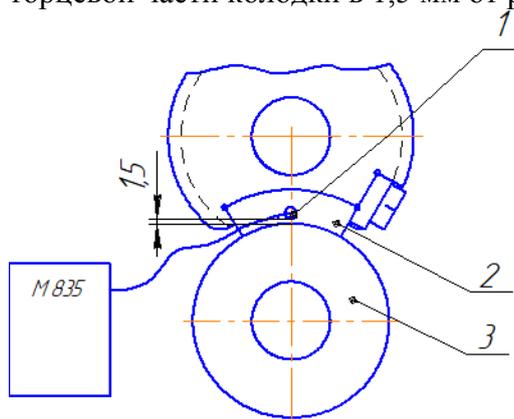
Материал	Содержание легирующих элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Cu	Mo	B	S	P	Ca
Эксперим. сплав	3,7	2,8	10,5	0,8	0,35	0,75	0,05	0,03	0,65	0,1
Твердость НВ 220 ... 230										

Микротвердость определяли с помощью прибора ПМТ-3 (ГОСТ 10717-75). Исследование микрощлифов экспериментальных сплавов производили на металлографическом микроскопе МИМ-7.

Определение фазового состава и искажений кристаллической решетки осуществляли модернизированным дифрактометром ДРОН-2. С целью совершенствования методики рентгеновских исследований, а также снижения трудоемкости и повышения точности анализа полученных дифрактограмм, нами было разработано контроллер, предназначенный для управления режимом счета импульсов при сканировании образца в дискретном режиме. Импульсы, принятые детектором, передаются на ЭВМ после преобразования в цифровой сигнал специальной программой драйвером и далее обрабатываются в среде Turbo Pascal 7.0.

Для изучения характера взаимодействия структурных составляющих гетерогенного сплава на микроуровне в пространстве, были выполнены сколы исследуемого металла и проанализирована их поверхность на сканирующем электронном микроскопе JSM-U3.

Испытания на износостойкость осуществлялись на стандартных машинах трения МИ1 и СМЦ-2 по схеме трения «колодка-ролик». Колодки изготавливали из фосфористого и экспериментального марганцовистого чугунов, а контртелом служил закаленный ролик 50Г2. С целью оценки температуры, возникающей в зоне трения и объемного разогрева сопряжений была применена термопара К-типа, которая была установлена в отверстие, подготовленное в торцевой части колодки в 1,5 мм от рабочей поверхности (рис. 1).



1 – термопара К- типа;  
2 – колодка; 3 – ролик

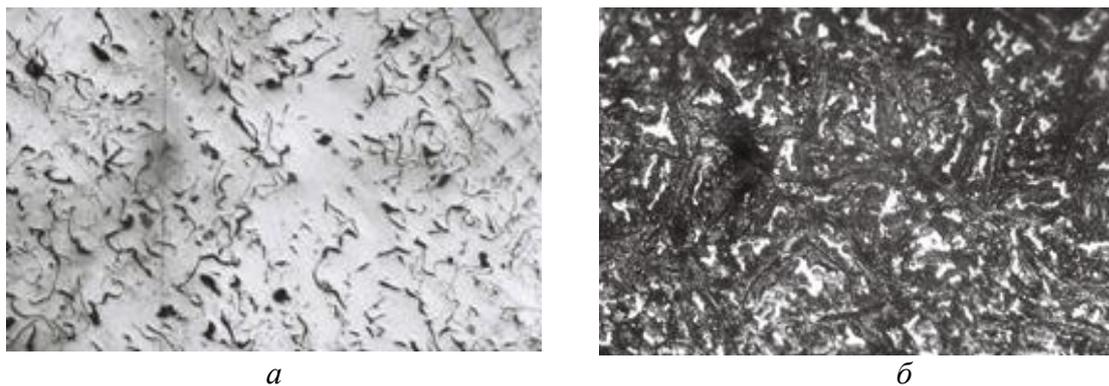
Рисунок 1 – Схематичное изображение места установки термопары в колодке в паре с контртелом (роликом)

Предложенное расположение и фиксация термопары в колодке позволила оценивать температуру разогрева колодки с возможностью относительно точного расчета средней поверхностной температуры зоны контакта в течении испытания [9].

## 3 Результаты исследований

В результате металлографических исследований была проанализирована микроструктура экспериментального сплава (рис. 2) и определены наиболее ее качественные отличия по

отношению к серому чугуну, а именно: экспериментальный чугун имел существенно более мелкие и короткие по протяженности графитные включения вермикулярной формы. Такая компактная форма графита значительно повышает прочность сплава и обеспечивает сохранение триботехнических свойств благодаря смазывающим свойствам графитных включений. После травления 4%-ым спиртовым раствором азотной кислоты были выявлены структурные составляющие сплава – карбидные включения: относительно мелкие, не образовывали сплошные поля и равномерно распределялись в металлической матрице. Карбидная основа сплава формирует прочный скелет, способный обеспечить не только высокую механическую, но и температурную прочность.



*a* – шлиф не травленный  $\times 100$ ; *б* – шлиф протравленный (4 %  $\text{HNO}_3$ )  $\times 100$ ;

Рисунок 2 – Фото микрошлифов экспериментального чугуна (*a* – перед травлением)

Рентгеноструктурное исследование экспериментального сплава, проведенные на дифрактометре Дрон-2 с применением усовершенствованной схемы подсчета импульсом в дискретном режиме позволили выявить фазовый состав микроструктуры сплава (табл. 2), где представлена микроструктура марганцовистого сплава в состоянии отливки (ИАЧл), а также после закалки (ИАЧл) [10]. Основу сплавов составляло  $\gamma$  – железо аустенита и перлит, карбиды и графитные включения. С увеличением скорости охлаждения соотношение  $\gamma/\alpha$  повышалось, карбиды и графитные включения становились более дисперсными, а общая площадь ими занимаемая существенно сокращалась.

Фазовый и структурный состав экспериментально сплава отвечал основам возникновения нового, третьего тела при механическом взаимодействии данного сплава с металлическим контртелом. В частности, метастабильная аустенитная матрица, имеющая относительно невысокую твердость в исходном (литом) состоянии может активно упрочняться в результате фазовых превращений и механического упрочнения (наклепа), а твердые, износостойкие включения простых карбидов, обеспечивают жесткость и прочность металлической основы; разобщенные и тонкие пластинки графитных включений вермикулярной формы могут «играть роль» смазки как непосредственно (при сухом трении), так и путем выделения ранее адсорбированного смазочного материала. Учитывая тот факт, что аустенитная основа сплава отличается высокой жаропрочностью, можно утверждать, что под воздействием высоких температур, в том числе при продолжительном действии, например от раскаленных газов или фрикционном разогреве, прочность основы материала существенно не изменится, а значит обеспечит высокой эксплуатационный ресурс и надежность деталей машин.

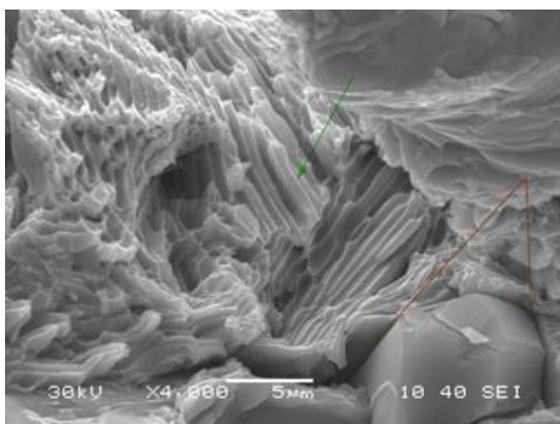
Исследование поверхности разрушения экспериментального и серого чугунов, при помощи электронного микроскопа позволило провести сравнительный анализ характера взаимодействия структурных составляющих сплава и установить их взаимосвязь при пластической деформации и разрушении (рис. 3). Наблюдения снимков микроструктур перлитного и

аустенитного (экспериментального) чугунов показали, что структура серого чугуна имела высокую разобщенность по граница структурных составляющих (трещины) и это согласуется с классическими представлениями, объясняющими низкую прочность серых чугунов и механизм их разрушения.

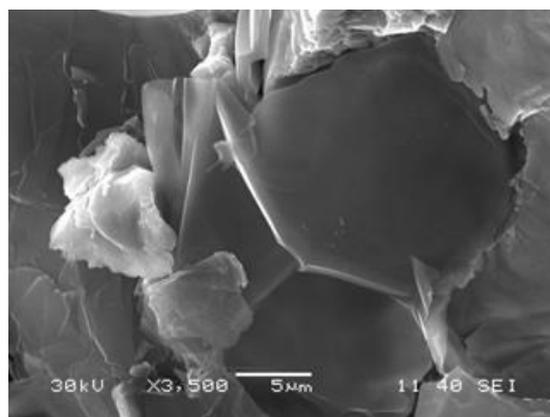
Таблица 2 – Результаты металлографических измерений

Сплав	Твердость, НВ	Карбидные включения			Графитные включения			Уширение линии В, мм		Твердость составляющих × 10 МПа		
		V, %	S <sub>V</sub> , мм <sup>2</sup> /мм <sup>3</sup>	ΔS, мм <sup>2</sup> /мм <sup>3</sup>	V, %	S <sub>V</sub> , мм <sup>2</sup> /мм <sup>3</sup>	ΔS, мм <sup>2</sup> /мм <sup>3</sup>	γ (111)	α (110)	аустенита	перлит	карбидов
ИАЧл	230	16,2	37,9	234,0	12,4	28,0	225,8	25,2	6,7	455	230	1115
ИАЧз	170	10,4	6,0	285,7	5,2	19,7	182,4	33,1	–	320	–	962

Вид излома аустенитного сплава имел мелкослоистую структуру, на поверхности излома были отчетливо видны двойники деформации, характерные для аустенита, а мелкодисперсные карбидные и графитные включения в абсолютном большинстве случаев заволакивались основой и вязко залегали в ней, не обнаруживая выраженных границ раздела с основой. Это указывает на тот факт, что при возникновении механических напряжений аустенитная кристаллическая основа активно деформируется на микроуровне и сталкиваясь с внутренними препятствиями в виде карбидов или трещин на границе графитных образований упрочняется на них двойникованием и запирает их в структуре, препятствуя дальнейшему движению микротрещин и выкрашиванию составляющих. Проведенные наблюдения позволили сформировать представление о механизме упрочнения сплавов на основе аустенита, в том числе марганцовистого чугуна.



а



б

а – серого перлитного чугуна и б - марганцовистого аустенитного чугуна

Рисунок 3 – Фрактограммы изломов (СЭМ)

Исследование износостойкости аустенитного марганцовистого чугуна в сравнении с серым перлитным СЧ 25 и конструкционной сталью марки 45 подтвердили выдвинутые ранее предпосылки о существенном превосходстве экспериментального чугуна при изнашивании материалов в условиях сухого трения (рис. 4). В процессе изнашивания температура в

приповерхностном слое (1,5 ... 2 мм) достигала по данным термопары 350 ... 400 °С. Изнашивание материалов осуществляли под воздействием двух факторов: давления (0,25 ... 2,0 МПа) и скорости скольжения (0,1 ... 1 м/с). При этом, одновременно с определением износа, наблюдали за изменением коэффициента трения. С ростом скорости скольжения и удельного давления коэффициент трения и износ у различных материалов изменялся не линейно, так, например, с ростом удельного давления коэффициент трения пропорционально повышался у всех материалов, но при значении 1,5 МПа в паре стальных образцов появлялись резкие скачки коэффициента трения (схватывания), проявлявшиеся при осмотре поверхностей в виде борозд. Аналогичные наблюдения отмечались у СЧ25, но при давлении 2 МПа и, как правило происходили при завершении акта испытаний (продолжительность 25 мин). Это свидетельствует о снижении прочности сплавов, имеющих схожие структуры (перлитная основа) от фрикционного разогрева. Работоспособность СЧ25 была выше из-за наличие большого количества графита на поверхности, а также карбидов. С ростом давления свыше 1,5 МПа в паре трения с аустенитным чугуном рост коэффициент трения стабилизировался и даже несколько снижался, при этом проявлений схватывания не наблюдалось даже при давлении в 2,5 МПа. Исследование микроструктуры экспериментального аустенитного чугуна, проведенное после триботехнических испытаний показали, что поверхностный слой глубиной 0,5 мм претерпел существенные структурные изменения в виде глубокого искажения кристаллической решетки по результатам оценки микронапряжений 2-го рода, изменению фазового состава и как следствие привел к повышению микротвердости твердости в 1,7 ... 2,1 раза.

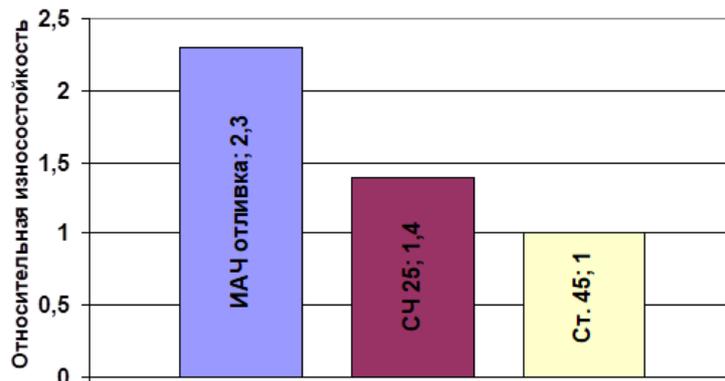


Рисунок 4 – Относительная износостойкость испытуемых материалов

### Обсуждение и заключение

Исследования структуры и механических свойств конструкционных сплавов (стали 45 и серого чугуна СЧ 25) в сравнении с марганцовистым аустенитным чугуном экспериментального состава показали, что гетерогенная структура экспериментального чугуна отличается повышенными в 1,7 ... 2,5 раза механическими свойствами, в частности при сухом изнашивании. Относительно высокая стойкость сплава объясняется следующими ключевыми факторами:

- метастабильный аустенит, составляющий основу сплава и полученный в результате равновесного охлаждения при легировании марганцем способен существенно упрочняться от механического воздействия и фазовых превращений;

- аустенитная основа сплава отличается высокой жаропрочностью, препятствующей размягчению от длительного воздействия температуры, в том числе фрикционного разогрева;

- гетерогенный состав экспериментального сплава, образованный относительно вязким аустенитом, мелкодисперсными карбидными и графитными включениями обеспечивает высокую стабильность структуры и ее приспособляемость к восприятию внешних экстремальных нагрузок и температур.

Исходя из вышерассмотренных свойств экспериментального сплава, наиболее перспективными направлениями его применения являются детали машин, работающие на износ

в т.ч. при сухом трении и скорости относительного скольжения до 1,5 м/с, а также внешнем и внутреннем фрикционном разогреве до 700 °С, например втулки (седла) клапанов двигателей внутреннего сгорания, тормозные колодки железнодорожного транспорта, шкивы подъемно-транспортных машин и т.п.

### Список литературы

- 1 Александров, М. П. Тормоза подъемно-транспортных машин / М. П. Александров. – М. : Машиностроение, 1976. – 383 с.
- 2 Литовченко, Н. Н. Восстановление дисков сцепления, тормозных барабанов, дисков и шкивов электродуговой металлизацией / Н. Н. Литовченко, Г. Г. Раджабов, И. В. Денисов // Сварочное производство. – 2001. – № 7. – С. 39-40.
- 3 Попов, Д. А. Анализ работы фрикционных пар трения лесовозных и подъемно-транспортных машин. Возможный путь повышения их долговечности / Д. А. Попов // Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве эксплуатации, сервисе и ремонте : сб. науч. тр. Вып.2 – Воронеж, 2007. – С. 41-44.
- 4 Попов, В. С. Сопротивление абразивному изнашиванию сплавов со структурой метастабильного аустенита в зависимости от их химического состава / В. С. Попов, Н. Н. Брыков, М. И. Андрющенко // Трение и износ. – 1991. – № 3. – С. 59-60.
- 5 Dastur Y. N., Leslie W. C. Mechanism of work hardening in Hadfield manganese steel. *Int. Trans. A.12.* 1981, № 5, – P.749-759.
- 6 Коршунов, Л. Г. Влияние марганца на износостойкость марганцовистых метастабильных аустенитных сталей / Л. Г. Коршунов, Н. Л. Черненко. // Трение и износ. – 1984. – т. 5, № 1. – С. 106-112.
- 7 Филиппов, М. А. Метастабильный марганцевый аустенит как структурная основа сталей с высокой стойкостью в условиях динамического контактного нагружения / М. А. Филиппов // МиТОМ, 1995. – № 10. – С. 12-15.
- 8 Патент 2337175 Российская Федерация, МПК С22С 37/10. Износостойкий чугун / Станчев Д. И., Попов Д. А. ; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. лесотехн. акад. – № 2007108431 ; заявл. 06.03.07 ; опубл. 27.10.08, Бюл. № 30. – 4 с.
- 9 Станчев, Д. И. Методика исследования явлений в поверхностных слоях трения / Д. И. Станчев, Д. А. Попов // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления. Меж. Вуз. Сб. науч. тр. Вып.11 – Воронеж, 2006. – С.65-68.
- 10 Попов, Д. А. Исследование влияния термической обработки аустенитного марганцовистого чугуна на его структуру и физико-механические свойства / Д. А. Попов, Е. А. Спирин. Приоритетные направления развития науки и техники: доклады Всеросс. науч.-техн. конф. / под общ. ред. чл.-корр. Российской акад. Наук В. П. Мешалкина. – Тула : ТулГУ, 2007. – С. 170-171.

### References

- 1 Aleksandrov, M. P. Brakes of lifting and transport machines / M. P. Aleksandrov. – M. : Mechanical Engineering, 1976. – 383 p.
- 2 Litovchenko, N. N. Restoration of clutch discs, brake drums, discs and pulleys by electric arc metallization / N. N. Litovchenko, G. G. Radzhabov, I. V. Denisov // Welding production. – 2001. – №. 7. – S. 39-40.
- 3 Popov, D. A. Analysis of the work of friction pairs of friction of timber and lifting-transport machines. Possible way to increase their durability / D. A. Popov // Advanced technologies, vehicles and equipment in the production of operation, service and repair : collection of articles. scientific. tr. Issue 2 – Voronezh, 2007. – S. 41-44.

4 Popov, V. S. Resistance to abrasive wear of alloys with a metastable austenite structure depending on their chemical composition / V. S. Popov, N. N. Brykov, M. I. Andryushchenko // Friction and Wear. – 1991. – №. 3. – S. 59-60.

5 Dastur Y. N., Leslie W. C. Mechanism of work hardening in Hadfield manganese steel. *Het. Trans. A.12.* 1981, №. 5, – P.749-759.

6 Korshunov, L. G. Influence of manganese on wear resistance of manganese metastable austenitic steels / L. G. Korshunov, N. L. Chernenko // Friction and wear. – 1984. – vol. 5, №. 1. – S. 106-112.

7 Fillipov, M. A. Metastable manganese austenite as a structural basis of steels with high resistance under dynamic contact loading / M. A. Filippov. // MITOM, 1995. – № 10. –S. 12-15.

8 Patent 2337175 Russian Federation, IPC S22S 37/10. Wear-resistant cast iron / Stanchev D. I., Popov D. A. ; applicant and patentee Voronezh. state forestry engineering. acad. – №. 2007108431 ; declared 03.06.07 ; publ. 10.27.08, Bul. №. 30. – 4 p.

9 Stanchev, D. I. Methods for studying phenomena in surface layers of friction / D. I. Stanchev, D. A. Popov // Mathematical modeling, computer optimization of technologies, parameters of equipment and control systems. Between. University. Sat. scientific. tr. Issue 11 – Voronezh, 2006. – P.65-68.

10 Popov, D. A. Research of the influence of heat treatment of austenitic manganese cast iron on its structure and physical and mechanical properties / D. A. Popov, E. A. Spirin. Priority directions of development of science and technology: reports of the All-Russian. scientific and technical conf. / under total. ed. Corresponding Member Russian acad. V.P. Meshalkin. – Tula : TulSU, 2007. – S. 170-171.

© Попов Д.А., Хрипченко М.С., Агарков С.Д. 2021