

## РАЗДЕЛ 2. МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 629.463.014.3

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СПЕЦИАЛЬНОГО ЧУГУНА ЧМН-35М

А.В. Габец, А.М. Марков, Д.А. Габец

*Колпак скользуна является тяжелонагруженной сменяемой деталью установленной в тележке грузового вагона, ввиду низких служебных свойств стального колпака предложено применение чугуна в качестве альтернативного материала. Чугун с повышенной износостойкостью получается путем его легирования чугуна СЧ35 молибденом и никелем при модифицировании цирконием, барием, кальцием и алюминием.*

*Исследования полученного сплава показало, что его механические свойства в полной мере могут обеспечивать необходимую износостойкость и повышенные прочностные характеристики, а структура материала позволяет улучшить фрикционные параметры трибосочетаний пар трения узлов тележки грузового вагона.*

*С помощью компьютерного моделирования проведен прочностной анализ конструкции чугунного колпака скользуна при различных режимах его работы.*

*Ключевые слова: колпак скользуна тележки грузового вагона, серый чугун марки СЧ35, чугун марки ЧМН-35М, легирование и модифицирование чугуна, химический состав, микроструктура, механические свойства, износостойкость.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Одной из ответственных деталей грузового железнодорожного вагона, определяющей его эксплуатационную надежность, является колпак скользуна. Колпак устанавливается на опору в надрессорной балке тележки (рисунок 1) и предназначен для удерживания кузова вагона при действии боковых сил.

Значительное влияние на динамику вагона и на преждевременный износ деталей тележки грузового вагона оказывают зазоры в горизонтальных скользунах. Суммарный зазор между скользунами с обеих сторон тележки у четырехосных вагонов должен быть не менее 4 и не более 20 мм. Отсутствие зазоров между скользунами по диагонали не допускается. Применяемые материалы при производстве скользунов не в полной мере обеспечивают безопасную эксплуатацию вагонов. В текущий ремонт из-за неисправностей тележек поступает около 14 % вагонов, большинство из-за преждевременного износа фрикционного клина и колпака скользуна [1, 2].

В настоящее время российской промышленностью колпак скользуна чаще всего изготавливается из стали 20ГЛ (ГОСТ 977-88). Данный материал не в полной мере, обеспечивает регламентированный пробег грузового вагона, составляющий, согласно норматив-

ной документации, не менее 160 тыс. км или трех лет эксплуатации.

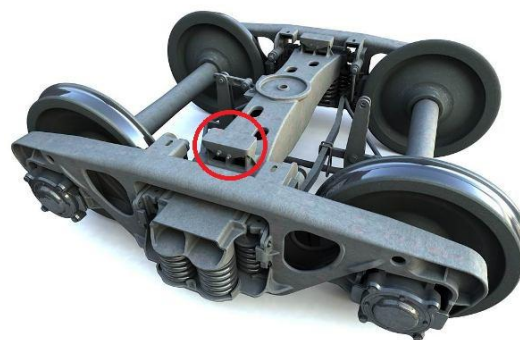


Рисунок 1 – Место установки колпака скользуна на тележке

#### АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ СЛУЖЕБНЫХ СВОЙСТВ КОЛПАКА СКОЛЬЗУНА В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Неисправности деталей тележки выражаются в изменении их первоначальных форм, размеров, массы, структуры материала и механических свойств, а также в изменении качества поверхностей и нарушении взаимного расположения деталей.

Факторы, определяющие неисправности деталей тележки грузового вагона, можно

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СПЕЦИАЛЬНОГО ЧУГУНА ЧМН-35М

свести в три группы: конструктивные, технологические и эксплуатационные. При правильном их учете и использовании в процессе конструирования, изготовления и эксплуатации деталей тележки грузового вагона могут снизить изнашивание ее деталей, повысить надежность и долговечность.

Нагрузки, действующие на тележки, носят случайный характер и зависят от полезной нагрузки, скорости движения, состояния пути и ряда других факторов, поэтому и отказы также носят случайный характер.

Все дефекты тяжело нагруженных элементов тележки можно разбить на две основные группы: дефекты усталостного происхождения и износы трущихся поверхностей.

Для установления величин износов поверхностей детали в условиях производства обычно применяется размерный способ. Сущность способа заключается в определении разницы в размерах между размерами новой детали и детали на первом деповском ремонте в месте износа.

С целью установления фактического состояния деталей тележки грузового вагона на первом деповском ремонте была разработана методика определения износов деталей тележ-

ки. Данные по износам тележки были собраны на предприятии ОАО «Вагонная ремонтная компания - 2», во время первого деповского ремонта. Дефектацию прошли 260 вагонов.

Увеличение зазоров между скользунами, как правило, происходит из-за износа плоскости трения съемного колпака скользуна (рисунк 2).



Рисунок 2 – Износ колпака скользуна

Количественный анализ износа колпака скользуна представлен на рисунке 3. Износ определялся измерением расстояния от поверхности до центра нижнего отверстия.

№	Износ, мм	Колпак скользуна, шт.
1	до 1	601
2	от 1 до 2	47
3	от 2 до 3	27
4	свыше 3	77
5	дефект	2
	Итого	752



Рисунок 3 – Износ колпака скользуна

Недопустимым считается износ опорной поверхности колпака более 3 мм, следовательно, более 10 % стальных колпаков скользуна не выполняют свои служебные свойства даже до первого деповского ремонта вагона.

В качестве альтернативного материала для колпака скользуна могут использоваться износостойкие чугуны, в частности, чугун марки СЧ35 [3]. Данный чугун, кроме более высокой твердости (210–275 НВ), по сравнению со сталью 20ГЛ (140–160 НВ), содержит в своем составе графит, который играет роль твердой смазки. Однако для обеспечения условий ударно-фрикционной эксплуатации этого не всегда достаточно.

### РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОЙ МАРКИ ЧУГУНА

Указанные выше причины, стали основанием для разработки нового высокопрочного чугуна, обладающего улучшенным комплексом основных физико-механических и служебных свойств таких как: меньшая склонность к разрушению и более высокий уровень сопротивления ударному и длительному циклическому воздействию.

Для улучшения механических свойств, в состав регламентируемого химического состава марки чугуна СЧ35, была введена композиция из расчетных легирующих и модифицирующих добавок никеля, молибдена, циркония, бария, кальция, алюминия как элементов

с высокой термодинамической активностью и специфическими физико-химическими свойствами, которые в соотношении с базовыми компонентами существенно влияют на процессы структурообразования литого чугуна, а также положительно воздействуют на форму, размер и дисперсность образующихся феррито-перлитных, графитных и других структурных составляющих [4, 5].

Большое значение в процессе структурообразования серого чугуна и формирования требуемого уровня механических свойств отливок, имеет соотношение содержания графитизирующих элементов углерода и кремния. Исследования показали, что наилучшие результаты обеспечивает содержания углерода до 3,4 % и кремния до 1,6 %, тогда как увеличение этого содержания за указанные пределы приводит к существенному снижению степени эвтектичности чугуна и способствует подавлению механизма графитизирующего модифицирования [6].

Повышению качества литого металла и улучшения его технологичности способствует соблюдение условия, когда отношение Mn/S составляет более 6,5. В этом случае избыточная часть серы в чугуне связывается в

сульфид марганца и выводится в шлак. При несоблюдении указанного требования в сочетании с другими технологическими указаниями, задача получения качественного литья с заданными служебными характеристиками и свойствами существенно усложняется.

Данные рекомендации по разработке химического состава новой марки чугуна для ударно-фрикционных узлов тележки грузового вагона реализованы на Алтайском сталелитейном заводе (ООО «АСЛЗ»), имеющем необходимый комплекс оборудования для выплавки и экспериментальной оценки технологических и служебных характеристик чугуна.

Проведенные исследования образцов, изготовленных из отливок чугуна ЧМН-35М установили, что значение временного сопротивления на разрыв составляет свыше 380 Н/мм<sup>2</sup> при средней твердости 285 НВ.

Микроструктура чугуна марки ЧМН-35М имеет перлитную или феррито-перлитную металлическую основу с равномерно распределенными включениями пластинчатого, завихренного или гнездообразного графита (рисунок 4): ПГф1, ПГф2-ПГр1, ПГр3-ПГд90-ПГ10-Пт1-П85-ПД0,5-Ц2-Цп2000.

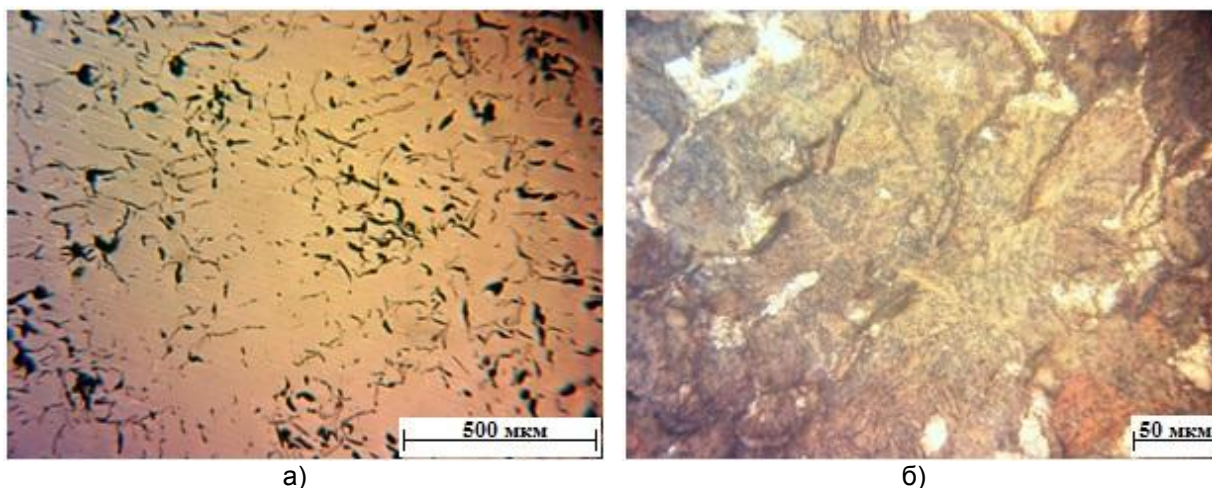


Рисунок 4 – Микроструктура: а) пластинчатая завихренная форма включений графита; б) включения цементита

На основе полученных результатов были разработаны ТУ на химический состав и ме-

ханические свойства чугуна ЧМН-35М, приведенные в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Химический состав чугуна марки ЧМН-35М

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СПЕЦИАЛЬНОГО ЧУГУНА ЧМН-35М

Таблица 2 – Механические свойства чугуна марки ЧМН-35М

Марка чугуна	Временное сопротивление при растяжении, МПа, (кгс/мм <sup>2</sup> ), не менее	Твердость по Бринеллю	
		не менее	не более
ЧМН-35М	350 (35)	250	300

Микроструктуру чугуна определяли на шлифах, изготовленных из экспериментальных отливок колпака скользуна. Исследование приводилось на инвертированном микроскопе при увеличениях  $\times 100$  и  $\times 500$ . Просмотр шлифов в нетравленном виде позволил идентифицировать графитную фазу (рисунок 4а).

Структура чугуна содержит включения пластинчатого прямолинейного и завихренного графита равномерного распределения. Длина включений до 120 мкм в количестве до 12 % площади микрошлифа. Металлическая основа: перлит пластинчатый, содержание перлита до 98 % с межпластинчатым расстоянием до 0,8 мкм, включения цементита площадью до 2000 мкм<sup>2</sup> в количестве до 2 % от площади микрошлифа (рисунок 4б).

Для исследования износостойкости материалов была применена «Методика испытания материалов на износостойкость» разработанная на предприятии ООО «АСЛЗ» [2, 7].

Проведен ряд сравнительных триботехнических испытаний для установления зависимости весового износа, от марки материала в результате взаимодействия трущихся поверхностей. В качестве испытательного оборудования используется машина трения модели 2168 УМТ.

Исследования проводились с использованием специально изготовленных образцов, представляющих собой пару трения «вал –

колодка» (рисунок 5). Образцы в виде вала были изготовлены из серийного серого чугуна марки СЧ35 и чугуна марки ЧМН-35М. В качестве контртела выступают колодки, изготовленные из стали 20ГЛ, 30ХГСА и 09Г2С [8].

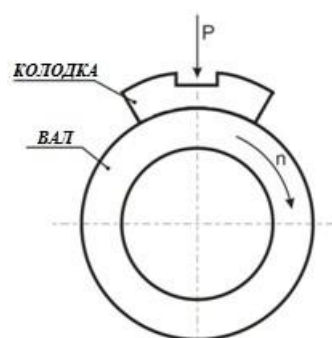


Рисунок 5 – Схема испытания «вал – колодка»

Испытания проводились на режимах, соответствующих условиям эксплуатации:

- длина пути: 1000 метров;
- скорость вращения вала: 500 об/мин;
- нагрузка колодки: 20 кг/см<sup>2</sup>.

Испытания износостойкости каждой пары проводили не менее трех раз.

Результаты определения износостойкости (потери массы) «вала» и «колодки» представлены в таблице 3 и на рисунке 6.

Таблица 3 – Масса весового износа

№	Образец	Материал	Масса весового износа, гр.	Суммарный износ пар трения, гр.
Опора кузова вагона – Колпак скользуна				
1	Колодка	30ХГСА	0,12	1,13
	Вал	СЧ35	1,01	
2	Колодка	30ХГСА	0,05	0,56
	Вал	ЧМН-35М	0,51	
3	Колодка	20ГЛ	0,04	1,02
	Вал	СЧ35	0,98	
4	Колодка	20ГЛ	0,12	0,78
	Вал	ЧМН-35М	0,66	
5	Колодка	09Г2С	0,45	0,80
	Вал	20ГЛ	0,35	
6	Колодка	09Г2С	0,13	0,69
	Вал	ЧМН-35М	0,56	

Анализ величин износа валов и колодок показывает, что износостойкость валов из чугуна марки ЧМН-35М примерно в 1,5 раза выше, чем валов из чугуна СЧ35

Результаты проведенных исследований

подтверждают соответствие свойств колпака скользуна из чугуна марки ЧМН-35М условиям прочности [9, 10]. По сравнению с используемым стальным колпаком скользуна имеются значительные улучшения прочностных свойств.

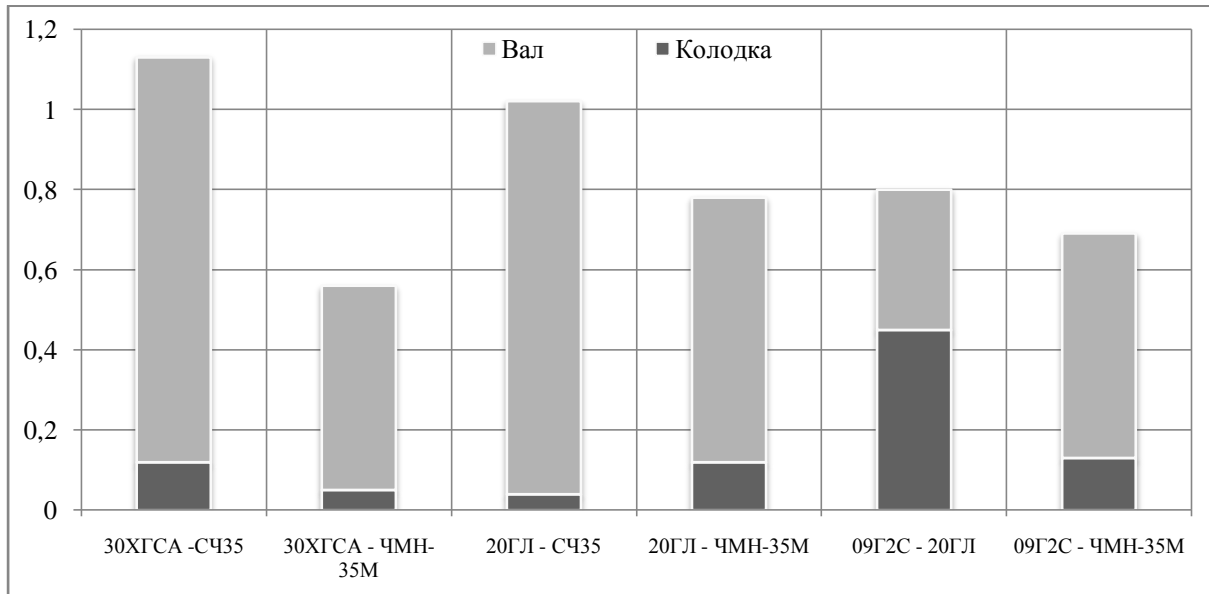


Рисунок 6 – Гистограмма весового износа узла опора кузова вагона – колпак скользуна

На основании сравнения результатов испытаний на машине трения можно утверждать, что чугун ЧМН-35М полностью соответствует эксплуатационным требованиям, что подтверждается испытаниями на износостойкость.

### РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ КОЛПАКА СКОЛЬЗУНА ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА СРЕДСТВАМИ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

#### ВЫЧИСЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ НАГРУЗОК

Так как колпак скользуна является составной частью надрессорной балки, то передаваемые им нагрузки определяются в контексте расчета нормативных параметров ее нагружения [11]. Применяемая схема приложения сил показана на рисунке 7.

При прохождении вагона по прямолинейному участку пути колпак скользуна находится в динамическом равновесии, то есть вертикальная сила  $P$  и продольная сила трения  $H$  отсутствуют (рисунок 8а).

При прохождении вагона по криволинейному участку пути на колпак начинает действовать вертикальная сила  $P$ . В результате поворота тележки относительно кузова вагона в образовавшейся паре трения возникает продольная сила трения  $H$  (рисунок 8б). При определенных скоростях движения это может привести к хрупким и усталостным разрушениям, а в некоторых случаях может приводить и к сходу подвижного состава с путей.

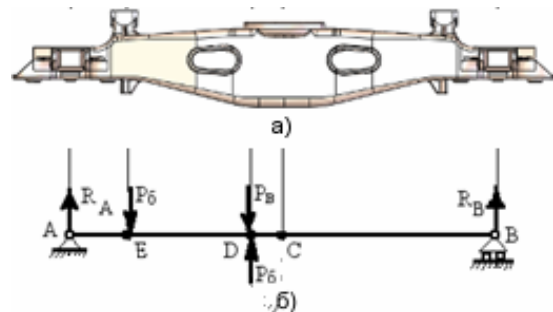


Рисунок 7 – Расчетная схема для определения боковой нагрузки:  
а) – надрессорная балка;  
б) – расчетная схема

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СПЕЦИАЛЬНОГО ЧУГУНА ЧМН-35М



Рисунок 8 – Схема взаимодействия колпака скользя и опоры кузова вагона: а) – при уравновешенном состоянии кузова вагона, б) – при наклоне вагона под действием боковых сил

Вертикальная нагрузка  $P$ , действующая на колпак скользя, определяется расчетным значением вертикальной составляющей от действия центробежных сил на наддрессорную балку тележки  $P_6$ ,  $P=P_6$ .

Продольная сила трения  $H$  вычисляется по формуле:

$$H = \mu P_6,$$

где  $\mu$  – коэффициент трения между рабочими поверхностями бокового скользя;

$P$  – вертикальная нагрузка, действующая на колпак,  $H$ .

Для осевой нагрузки в 23,5 т расчетное значение вертикальной составляющей боковой силы  $P_6 = 84,4$  кН. При использовании стального колпака коэффициент трения «сталь по стали»  $\mu = 0,18$ . Тогда  $H = 0,18 \cdot 84,4 = 15,2$  кН.

### РАЗРАБОТКА 3D-МОДЕЛИ СБОРКИ КОНТАКТИРУЮЩИХ ДЕТАЛЕЙ БОКОВОГО СКОЛЗУНА

3D-модель сборки, используемая для прочностного анализа колпака скользя, разрабатывается в инструментальной среде системы твердотельного моделирования SolidWorks [12]. На первом этапе моделирования создаются 3D-модели деталей скользя: ответной части скользя, установленной на нижнем листе шкворневой балки (рисунок 9а) и колпака скользя тележки (рисунок 9б).

На базе полученных моделей строится исходная 3D-модель сборки (рисунок 9в) с одним угловым таблично управляемым параметром.

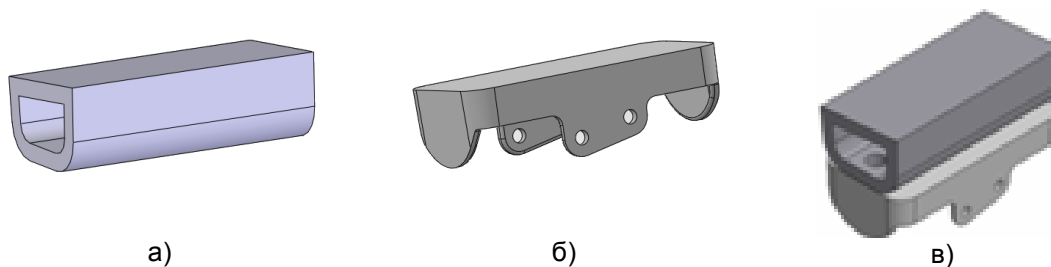


Рисунок 9 – Твердотельные модели: а) – модель ответной части скользя; б) – модель колпака скользя; в) – модель исходной сборки бокового скользя

### ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ 3D-МОДЕЛИ СБОРКИ БОКОВОГО СКОЛЗУНА НА КРИВОЛИНЕЙНОМ УЧАСТКЕ ПУТИ

Взаимное угловое расположение кузова и тележки вагона  $\beta$  при прохождении криволинейных участков пути (рисунок 10а) определяет соответствующее взаимное расположение контактирующих деталей бокового скользя. Величина данного угла определяется как  $\beta = 90^\circ - \alpha$ . Значение угла  $\alpha$  вычисля-

ется из решения прямоугольного  $\Delta ACO$  по формуле:

$$\alpha = \arccos \frac{l}{2 \cdot r},$$

где  $l$  – база вагона, м;

$r$  – радиус кривизны участка пути, м.

Полностью параметризованная модель сборки позволяет для каждого установленного значения кривизны пути [13] смоделировать взаимное расположение входящих в нее деталей (рисунок 10б).



Рисунок 10 – Угловое расположение: а – кузова и тележки вагона; б – колпака и ответной части скользуна

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВУЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА КОЛПАК СКОЛЬЗУНА

#### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Предварительно, рабочая 3D-модель сборки бокового скользуна перестраивается для

значения угла  $\beta$ , соответствующего заданному радиусу кривизны пути  $r$ . Например, радиусу  $r = 200$  м соответствует значение угла  $\beta = 1,95^\circ$ . Полученный результат твердотельного моделирования (рисунок 11а) загружается в инструментальную среду COSMOSSimulation [14], на базе которой выполняется исследование.

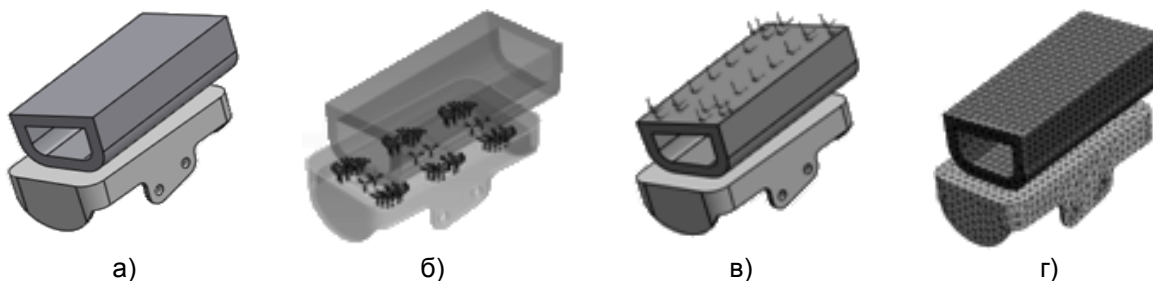


Рисунок 11. – Создание расчетной твердотельной модели сборки: а – исходная твердотельная модель; б – схема закрепления; в – схема приложения нагрузок; г – конечноэлементная сетка

#### РАСЧЕТ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В составе расчетной модели сборки бокового скользуна методом конечных элементов выполняется прочностной расчет колпака скользуна: эквивалентные напряжения (рисунок 12а) и коэффициент запаса прочности (рисунок 12б).

му объему модели не превышают 26,7 МПа, что удовлетворяет установленным в [15] допускаемым напряжениям. При этом расчетный коэффициент запаса прочности составляет не менее 10,5.

#### РАСЧЕТ УДЕЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ В ОБРАЗУЕМЫХ ПАРАХ ТРЕНИЯ

Различным угловым положениям соответствуют различные варианты силового замыкания в системе «кузов – тележка» (рисунок 13). Возникающее в образуемой скользунами паре трения удельное давление вычисляется по формуле:

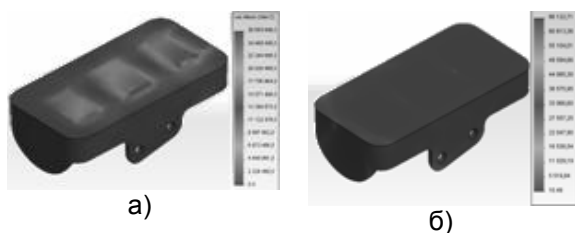


Рисунок 12. – Результаты прочностного расчета колпака скользуна: а – эквивалентные напряжения; б – коэффициент запаса прочности

$$P_{y0} = \frac{P_0}{S},$$

где  $P_0$  – нагрузка, действующая на колпак скользуна (вертикальная составляющая от действия центробежных сил), Н;

$S$  – площадь области контакта,  $m^2$ .

Расчетные значения напряжений по все-

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СПЕЦИАЛЬНОГО ЧУГУНА ЧМН-35М

Средствами SolidWorks моделируется область контакта и автоматически вычисляется ее площадь (рисунок 13).

Площади контакта размером в  $10,18 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$   $P_{\text{ул}} = 8,3 \text{ МПа}$  значительно превышает установленное в нормативное значение [15]. Выходом в данной ситуации является увеличение площади контакта внесением согласованных изменений в конструкцию скользунов рамы и тележки грузового вагона, конструктивно изменяя и колпак скользуна тележки.

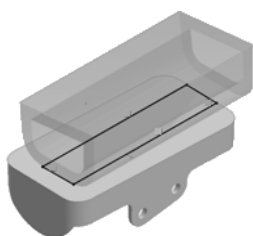


Рисунок 13 – Область контакта в боковом скользуна вагона

В таблице 4 представлены основные показатели расчета прочности колпака скользуна рассчитанные для стали 20ГЛ и чугуна ЧМН-35М во всем диапазоне эксплуатационных нагрузок.

Для колпака скользуна, изготовленного из ЧМН-35М, для которого допустимое напряжение при статической нагрузке составляет 260 МПа, конструкция удовлетворяет условию прочности. При действии среднеста-

тистических нагрузок коэффициент запаса прочности составляет не менее 7.

При проведении исследований было установлено существенное влияние прочностных свойств колпака скользуна тележки на величину межремонтного пробега грузового вагона [16].

В целом для колпака скользуна из чугуна марки ЧМН-35М расчетами подтверждено соответствие его конструкции условиям производства и эксплуатации. Установлено, что выявленное превышение рекомендованной величины момента трения, возникающего с его участием, в основном зависит от согласованной с ним конструкции скользуна кузова вагона. Применение износостойкого чугуна компенсирует действие этого фактора на износ колпака скользуна. На основе результатов моделирования и технологии изготовления чугунного колпака скользуна из ЧМН-35М, на предприятии ООО «Алтайский сталелитейный завод» была изготовлена опытная партия. Технический контроль показал, что чугунный колпак скользуна полностью соответствует чертежу и техническим требованиям, предъявляемым к данным деталям.

В настоящее время опытная партия колпаков скользуна изготовленных из чугуна ЧМН-35М установлены на полувагоны модели 12-132 на тележках модели 18-100 для проведения пробеговых испытаний на железной дороге [2].

Таблица 4 – Показатели прочности колпака скользуна

Материал колпака скользуна	Состояние колпака скользуна	Радиус пути, м	Максимальное напряжение, МПа	Минимальный коэффициент запаса прочности
Сталь 20ГЛ	Без износа	4000	25,7	19,0
		180	26,7	18,4
		60	74,7	6,6
	С износом	4000	21,2	25,4
		180	27,3	11,5
		60	75,6	4,2
Чугун ЧМН-35М	Без износа	4000	21,2	25,4
		180	24,4	24,8
		60	81,9	7,36
	С износом	4000	18,3	31,6
		180	30,0	28,2
		60	78,1	7,6

### ВЫВОДЫ

1. Исходя из проведенных исследований служебных свойств и их фактические эксплуатационные характеристики, наиболее

**ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2016**

перспективным направлением повышения долговечности и работоспособности колпака скользуна, является разработка нового материала на основе серого чугуна марки СЧ35, имеющего наилучшие базовые параметры по



прочности, износостойкости и трибологическим свойствам.

2. На основании сравнения результатов испытаний на износостойкость можно утверждать, что разработанный чугу́н ЧМН-35М полностью соответствует эксплуатационным требованиям. Материал обеспечивает высокие прочностные, износостойкие и фрикционные свойства с возможностью его работы в паре с опорой кузова вагона, изготовленной из стали 20ГЛ, 09Г2С и 30ХГСА. Применение нового износостойкого чугу́на способствует снижению износа трущихся поверхностей, что повышает безаварийность межремонтного пробега

3. Применение систем автоматизированного проектирования, позволило разработать и провести прочностной анализ конструкции чугу́нного колпака скользуна, а так же выполнить полный комплекс конструкторско-технологических работ по технической подготовке производства данного изделия, с последующим получением физических прототипов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шпади, Д. В. Новым грузовым вагонам – инновационные узлы и детали / Д. В. Шпади // Журнал Техника Железнодорожных дорог. – 2012. – № 1. – С. 46.
2. Габец, А. В. Исследование свойств и разработка эффективной конструкции опоры кузова вагона : монография / А. М. Марков, А. В. Габец, Д. А. Габец. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2016. – 81 с.
3. Габец, Д. А. Специальный модифицированный чугу́н марки ЧМН-35М для тяжело нагруженных деталей тележки грузового вагона / Д. А. Габец, А. М. Марков, А. В. Габец // Тяжелое машиностроение. – 2016. – № 1-2. – С. 23–26.
4. Гольдштейн, Я. Е. Модифицирование и микрولةгирование чугу́на и стали / Я. Е. Гольдштейн, В. Г. Мизин. – М. : Металлургия. – 1986. – 272 с.
5. Филиппов, Г. А. Фундаментальные исследования природы хрупкости – основа создания высокопрочных и надежных конструкционных материалов / Г. А. Филиппов // Сталь. – 2004. – № 8. – С. 69–78.
6. Габец, А. В. Специальный чугу́н для отливки фрикционного клина тележки железнодорожного вагона / А. В. Габец // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4/2. – С. 51–52.
7. Чертовских, Е. О. Триботехнические свойства специального чугу́на ЧМН-35М / Е. О. Чертовских, Д. А. Габец, В. В. Каргин, А. М. Марков, А. В. Габец // Инновации в машиностроении: 7-я международная научно-практическая конференция. – Кемерово : Изд-во КузГТУ, 2015. – С. 268–273.
8. Марков, А. М. Методика испытания материалов на износостойкость / А. М. Марков, Д. А. Габец, А. В. Габец, В. Н. Некрасов, В. В. Каргин // Инновации в машиностроении – основа технологического развития России. – 2014. – № 4. – С. 253–258.
9. Чертовских, Е. О. Перспективные пары трения литых и конструкционных материалов из сплава Fe-C / Е. О. Чертовских, Д. А. Габец, А. В. Габец // Ползуновский вестник. – 2015. – № 2. – С. 37–42.
10. Пат. 2562554 Российская Федерация, МПК С22С 37/00. Чугун / Габец А. В., Габец Д. А. ; заявитель и патентообладатель ООО «Алтайский сталелитейный завод». – № 2014118635/02 ; заявл. 08.09.14 ; опубл. 10.09.15, Бюл. № 25 – 3 с.
11. Вершинский, С. В. Расчет вагонов на прочность / С. В. Вершинский и др.; под ред. Л. А. Шадура. – 2-е изд. – М. : Машиностроение, 1971. – 432 с.
12. Прохоренко, В. П. SolidWorks. Практическое руководство / В. П. Прохоренко. – М. : ООО «Бином-Пресс», 2004. – 448 с.
13. СНиП "Система нормативных документов в строительстве строительные нормы и правила Российской Федерации" от 18 октября 1995 г. № 32-01-95 // МИИТ. Москва, 1995 (Минстрой России).
14. Алямовский, А. А. SolidWorks/COSMOS Works. Инженерный анализ методом конечных элементов / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
15. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
16. Габец, А. В. Методика исследования нормируемых показателей прочности колпака скользуна тележки грузового вагона средствами твердотельного моделирования / А. В. Габец, Д. А. Габец, А. В. Семенов, И. В. Левкин // Ползуновский вестник. – 2014. – №4-2. – С. 196–199.

**Габец Александр Валерьевич**, кандидат технических наук, директор по развитию, руководитель научно исследовательского сектора ООО «Алтайский сталелитейный завод», 656037, Алтайский край, г. Барнаул, пр-т Калинина, д. 116/52. тел.: (3852)50-18-87, e-mail: gabeca@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 Денис Александрович**, аспирант, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, тел.: +79635332000, e-mail: gabets22@mail.ru.