

УДК 629.113

РАСЧЁТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТИ ШАРОВЫХ ШАРНИРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ШАССИ АВТОМОБИЛЯ ПУТЁМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

И. А. Михайловский, д. т. н., доц. / И. Г. Гун, д. т. н., проф. / В. В. Сальников, к. т. н., доц. / В. И. Куцепедник, к. т. н., доц. / Е. И. Гун, асп.

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»

Д. С. Вдовин, к. т. н.

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана»

Анализ открытых источников выявил отсутствие расчётных методов определения основного прочностного показателя — усилия вырыва пальца из корпуса — наиболее ответственных элементов шасси — шаровых шарниров подвески и рулевых наконечников. В рамках проведённого исследования разработана конечно-элементная модель процесса вырыва пальца из корпуса, состоятельность которой была доказана экспериментально. Результаты исследования использованы в инженерной практике при проектировании элементов шасси, содержащих шаровые шарниры.

Шаровые шарниры подвески и рулевые наконечники являются одними из наиболее важных и ответственных элементов направляющего устройства подвески и рулевого привода соответственно, во многом определяющими надёжность систем подвески и рулевого управления. В связи с этим к данным узлам предъявляют совокупность жёстких функциональных и прочностных требований.

Наиболее распространённой причиной перехода шаровых шарниров подвески и рулевых наконечников в неисправное состояние является износ деталей узла. Однако обусловленные износом ухудшения параметров (стук в шарнирах, люфт рулевого управления, снижение жёсткости рулевого привода) не приводят к потере работоспособности систем подвески и рулевого привода и потому не являются критическими с точки зрения безопасности движения колёсной машины. Основной причиной отказов является разрушение либо в результате экстремального воздействия, превышающего возможности изделия по восприятию нагрузок, либо по причине накопления усталостных повреждений. Отказ рассматриваемых узлов по причине разрушения приводит к потере работоспособности подвески и рулевого привода, что в свою очередь может быть сопряжено с тяжёлыми последствиями. Поэтому с точки зрения безопасности движения колёсной машины для шаровых шарниров подвески и рулевых наконечников

основными могут считаться требования по усталостной и статической прочности.

Основным прочностным требованием к рассматриваемым узлам является обеспечение необходимых минимальных усилий вырыва и выдавливания шарового пальца из корпуса шарнира.

Известна работа [1], посвящённая исследованию напряжённо-деформированного состояния шарового шарнира подвески с целью определения прочностных характеристик узла. Однако по результатам данной работы не предложено каких-либо расчётных методов или моделей, которые могли бы быть использованы для определения конкретных регламентируемых прочностных показателей, в том числе усилия вырыва и выдавливания шарового пальца.

Также известны работы [2, 3], в которых, помимо прочего, была решена задача моделирования разрушения шарового шарнира подвески при осевом нагружении с целью определения усилия выдавливания. Проведённые экспериментальные и аналитические исследования позволили сделать вывод об удовлетворительной сходимости результатов разработанной математической модели с экспериментальными данными. Предложенная математическая модель процесса разрушения позволяет на этапах проектирования конструкции оценить степень соответствия усилия выдавливания имеющимся требованиям.

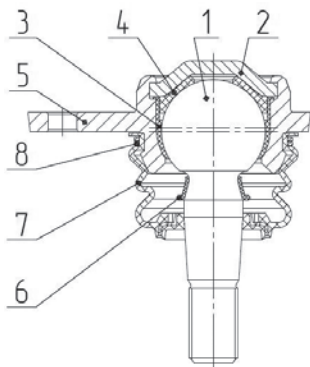


Рисунок 1. Шаровой шарнир 2123-2904192-03: 1 — шаровой палец; 2 — обойма вкладыша; 3 и 4 — части вкладыша, охватывающие экваториальную и полярную части головки; 5 — корпус; 6 — распорная втулка; 7 — чехол защитный; 8 — пружинное кольцо

Анализ открытых источников не выявил наличия расчётных методов определения усилия вырыва. В настоящее время определение усилия вырыва шарниров подвески и рулевых наконечников на большинстве российских производств автокомпонентов осуществляется экспериментально и носит проверочный характер. В этом случае при проектировании новой конструкции необходимость наличия изготовленных образцов для проведения испытаний и отсутствие неразрушающих методов контроля определяют длительные сроки проектирования и высокую стоимость доводочных работ. Кроме того, выбранное на основе экспертных оценок конструктивное решение для обеспечения требуемого усилия вырыва

не всегда может быть оптимальным и, как правило, приводит к нецелесообразному увеличению металлоёмкости конструкции, которое в конечном итоге отражается на её стоимости.

В этой связи актуальной может считаться задача разработки метода расчётного определения усилия вырыва, позволяющего на этапе проектирования контролировать соответствие данного показателя регламентированному уровню.

Указанная задача была решена на примере нижнего шарового шарнира 2123-2904192-03 подвески, который в настоящее время используется при сборке подвесок автомобилей ВАЗ-21214 и ВАЗ-2123 на конвейере ОАО «АвтоВАЗ» (рис. 1). Конструкция данного типа получила на сегодняшний день наибольшее распространение и является наиболее перспективной с точки зрения дальнейшего совершенствования.

Усилие вырыва предлагается определять в результате моделирования процесса вырыва пальца из корпуса методом конечных элементов по явной схеме интегрирования с учётом физической и геометрической нелинейности. В силу симметрии задачи рассматривают 1/12 часть шарнира с граничными условиями симметрии.

Основные допущения, принятые в конечно-элементной модели (КЭМ):

- упруго-пластическое поведение материалов описывают билинейной диаграммой напряжения-деформации.
- моделирование процесса вырыва проводят без учёта наличия вкладыша в сопряжении шарового

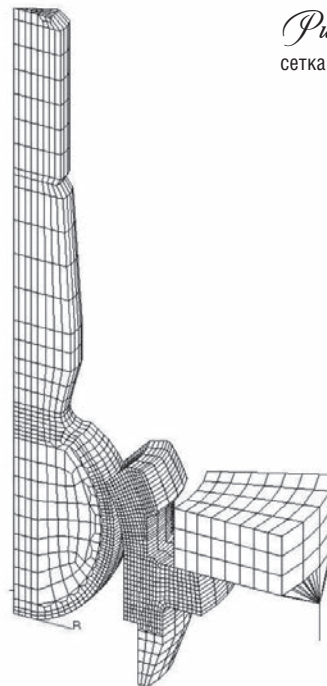
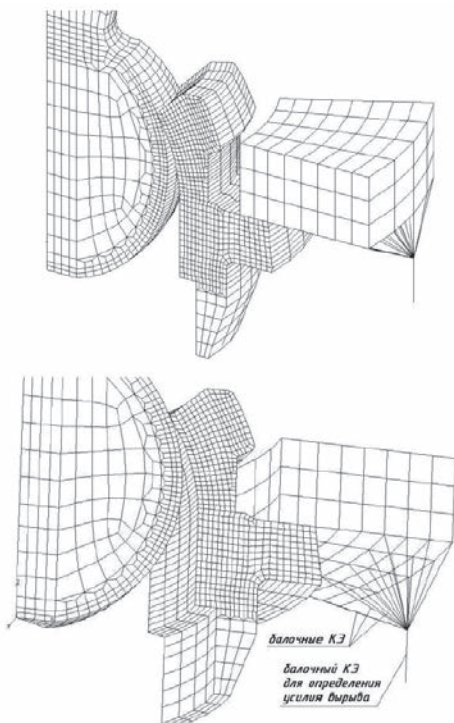


Рисунок 2. Конечно-элементная сетка шарового шарнира 2123-2904192-03

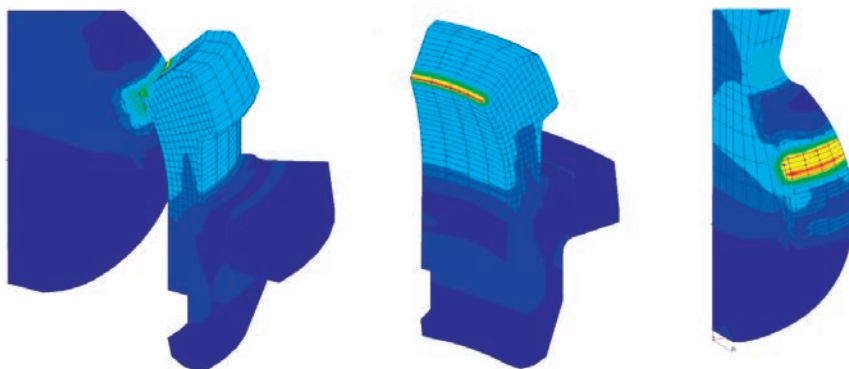


Рисунок 3. Качественная картина распределения эквивалентных напряжений в момент максимального усилия, полученная в результате моделирования испытаний образца № 1 для:
а — корпуса шарнира и шарового пальца;
б — корпуса шарнира; в — шарового пальца

пальца и корпуса шарнира ввиду того, что задачи определения и моделирования механических характеристик вкладыша после операций термостабилизации, учёт распределения давлений на поверхности шаровой головки после операций сборки, а также моделирование разрушения вкладыша в результате сжатия до нулевой толщины являются достаточно трудоёмкими. Кроме того, наличие в сопряжении вкладыша, выполненного из антифрикционного термопластичного материала, характеризующегося в два раза меньшей жёсткостью по сравнению с окружающими деталями, предположительно не должно оказывать существенного влияния на интересующее максимальное усилие, возникающее в процессе вырыва. В рамках проведённых экспериментальных работ была доказана справедливость данного допущения.

В состав КЭМ не включена обойма вкладыша в силу того, что она не оказывает ощутимого влияния на искомое усилие вырыва, а вместе с тем уменьшение количества конечных элементов позволяет сократить длительность расчёта.

Организация конечно-элементной сетки шарового пальца, корпуса шарнира и специальной оснастки, используемой при испытаниях на вырыв, осуществлялась с помощью объёмных элементов в виде восьмиузловых гексаэдров, имеющих три степени свободы в узле для вычисления действующих силовых факторов и перемещений, и одну точку интегрирования в центре элемента для определения напряжений и деформаций. В модель введены дополнительные балочные элементы для определения искомого усилия. Расчётное усилие вырыва считают равным максимальному значению продольной силы, возникающей в вертикально ориентированном балочном конечном элементе (рис. 2).

КЭМ содержала следующие граничные условия:

- условия симметрии;
- заделку в узле балочного элемента, исключающую перемещения вдоль трёх осей координат;
- контакт поверхности шаровой головки пальца и внутренней сферической поверхности корпу-

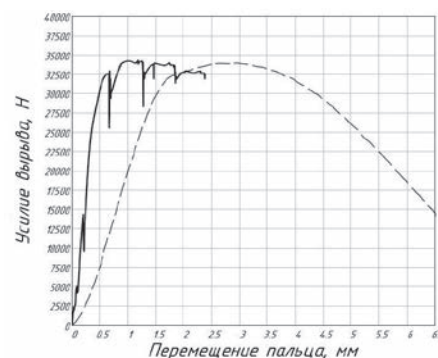


Рисунок 4. Экспериментальная (штрихпунктирная линия) и расчётная (сплошная линия) зависимость усилия от перемещения пальца для образца № 1

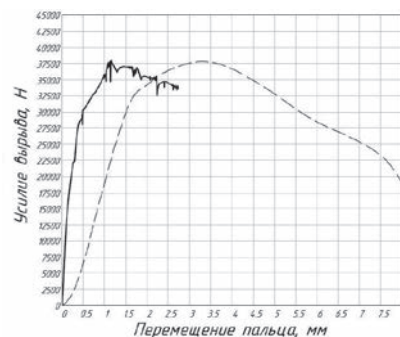


Рисунок 5. Экспериментальная (штрихпунктирная линия) и расчётная (сплошная линия) зависимость усилия от перемещения пальца для образца № 2

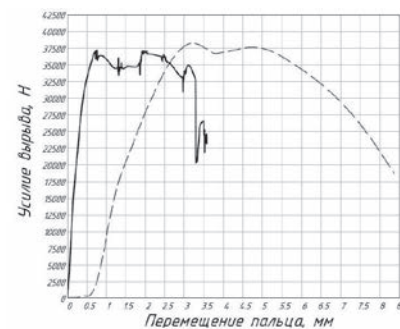


Рисунок 6. Экспериментальная (штрихпунктирная линия) и расчётная (сплошная линия) зависимость усилия от перемещения пальца для образца № 3

Таблица 1. Оценка точности разработанной модели вырыва пальца из корпуса без вкладыша

	Образец № 1	Образец № 2
Результат испытания шарнира без вкладыша, Н	33 962,2	37 788,1
Результат моделирования вырыва шарнира без вкладыша, Н	34 345,2	37 941,6
Различие	1,1 %	0,4 %

Таблица 2. Оценка влияния наличия вкладыша на усилие вырыва

	Образец № 3
Результат испытания шарнира с вкладышем, Н	38 249,2
Результат моделирования вырыва шарнира без вкладыша, Н	37 237,2
Различие	2,7 %

са, моделируемый по принципу «мастер-поверхность — зависимые узлы», реализующему метод штрафных функций;

- принудительное перемещение узлов, находящихся на резьбовой части пальца вдоль оси отверстия корпуса.

Необходимо отметить, что усилие вырыва определяется механическими характеристиками используемых материалов и геометрическими параметрами комплектующих. В настоящее время при получении заготовок основных деталей шаровых шарниров широкое распространение получили различные виды обработки металлов давлением [4, 5, 6]. Как правило, заготовки корпусов шаровых шарниров получают горячей объёмной штамповкой в открытых штампах. Изменение структуры и свойств металла при обработке давлением определяется температурно-скоростными условиями деформирования. Поскольку при получении заготовок корпусов в условиях мелко- и среднесерийного производства зачастую оказывается проблематичным обеспечение необходимых температурных условий ввиду быстрого охлаждения на воздухе и контакта с более холодным инструментом, материал корпуса может характеризоваться не полностью рекристаллизованной, неоднородной структурой, приводящей к разбросу механических свойств и снижению пластичности. Предварительные расчёты показали, что изменение геометрических параметров в пределах соответствующих полей допусков также оказывает ощутимое влияние на значение усилия вырыва. В конечном итоге совокупное влияние указанных случайных факторов приводит к тому, что усилия вырыва шар-

ниров одной партии могут отличаться на 20 %.

Таким образом, для адекватной оценки точности предложенной модели путём сравнения результата с экспериментальными данными необходимо, чтобы геометрические параметры деталей и механические характеристики их материалов, используемые в модели, соответствовали геометрии и свойствам образцов, для которых проводились испытания.

Для анализа целесообразности учёта наличия вкладыша представляется логичным испытание на вырыв шарнира без вкладыша, испытание шарнира в сборе (с вкладышем) и дальнейшее сравнение полученных результатов. Однако в силу того, что на усилие вырыва влияют упомянутые случайные факторы, не исключена ситуация, когда усилие вырыва для шарнира в сборе примет меньшее значение, чем для шарнира без вкладыша, чего быть не должно.

В связи со сказанным выше для адекватной проверки точности разработанной модели, а также для оценки влияния свойств вкладыша на усилие вырыва и анализа целесообразности их учёта была реализована следующая последовательность действий:

- измерение геометрии, определение свойств материалов и испытание на вырыв двух пар корпусов 2123-2904191-01 и пальцев 2123-2904064-01 без вкладышей (условно образцы № 1 и № 2) и одного шарнира 2123-2904192-03 в сборе (образец № 3).

- расчёт усилия вырыва для геометрии и свойств образца № 1 без учёта вкладыша. Сравнение результатов, доработка КЭМ.

- расчёт усилия вырыва для геометрии и свойств образца № 2 без учёта вкладыша с помощью доработанной КЭМ. Сравнение результатов расчёта и испытания, вывод об адекватности разработанной КЭМ.

- расчёт усилия вырыва для геометрии и свойств образца № 3 без учёта вкладыша. Сравнение с результатом испытаний данного шарнира в сборе. Вывод о влиянии свойств вкладыша на усилие вырыва.

Испытания шарового шарнира на вырыв проводились на разрывной машине TiraTest 2300 согласно техническим условиям на шаровые шарниры подвески, согласованным с ОАО «АвтоВАЗ». Механические свойства материалов деталей шарнира определялись по твёрдости их поверхностей. Твёрдость измеряли с помощью твердомера ТР 5006-02 по методике, изложенной в ГОСТ 9013–59. Измерение геометрических параметров корпуса шарнира и пальца проводили с помощью инструментального микроскопа БМИ-1Ц и специализированного программного обеспечения.

На рис. 3 приведены результаты расчёта напряжённо-деформированного состояния для образца № 1 в момент максимального усилия.

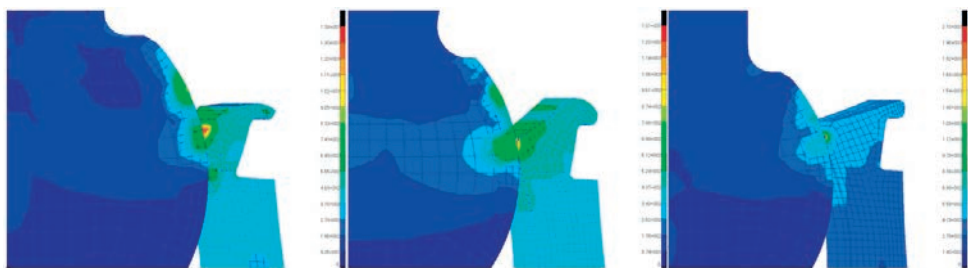


Рисунок 7. Результаты расчёта напряжённо-деформированного состояния шарового шарнира подвески автомобиля ВАЗ-2180 (Lada V) в момент максимального усилия для различных конструктивных исполнений деталей узла (показаны эквивалентные напряжения)

На рис. 4–6 приведены сравнения экспериментальных и расчётных зависимостей возникающего усилия от перемещения шарового пальца в процессе вырыва.

Анализируя экспериментальные и расчётные зависимости, необходимо сказать, что наклон расчётных кривых к оси абсцисс значительно больше в силу того, что в КЭМ не учитывалась податливость резьбового соединения и оснастки. Скачки усилия на расчётных кривых связаны с особенностями реализации метода штрафных функций при решении контактной задачи. Данные флуктуации не оказывают влияния на интересующее максимальное возникающее усилие.

Результаты проведённых расчётов и испытаний приведены в табл. 1 и 2.

Незначительное различие результатов расчёта и эксперимента для образцов № 1 и № 2 позволяет говорить об удовлетворительной точности разработанной модели вырыва пальца из корпуса без вкладыша для её использования в дальнейших исследованиях (табл. 1).

Различие расчётного значения усилия вырыва для шарнира без вкладыша, полученное с использованием проверенной модели, и результата испытания шарнира в сборе (образец № 3) незначительно, что позволяет говорить о том, что наличие вкладыша не оказывает существенного влияния на усилие вырыва и в дальнейших расчётах может не учитываться (табл. 2).

Разработанная и экспериментально проверенная КЭМ была использована конструкторскими службами ведущего производителя деталей шасси ЗАО НПО «БелМаг» в рамках конструкторской проработки шарового шарнира подвески автомобиля ВАЗ-2180 (Lada V) (рис. 7).

Расчёты, выполненные с использованием разработанной КЭМ, позволили провести сравнительный анализ различных конструктивных исполнений деталей шарнира и выбрать значения конструктивных параметров, обеспечивающие требуемое усилие вырыва.

По результатам проведённой работы можно сделать следующие выводы:

- разработана КЭМ процесса вырыва шарового пальца из корпуса шарнира, позволяющая опреде-

лять основной прочностной показатель элементов шасси, содержащих шаровые шарниры, — усилие вырыва шарового пальца из корпуса;

- сравнением результатов расчётных данных и результатов испытаний доказана адекватность разработанной КЭМ с точностью, приемлемой для прогнозирования усилия вырыва элементов шасси, содержащих шаровые шарниры;

- КЭМ была использована конструкторскими службами ведущего производителя деталей шасси ЗАО НПО «БелМаг» в рамках конструкторской проработки шарового шарнира подвески автомобиля ВАЗ-2180 (Lada V).

1. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Верняев М. А., Филькин Н. М., Терехов А. С. Исследование напряжённо-деформированного состояния шарового шарнира легкового автомобиля // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. — 2012. — Т. 1. — С. 307–311.
2. Калмыков Ю. В. Совершенствование процесса запрессовки с целью повышения уровня качества шарниров передней подвески автомобилей: автореф. дис. ... канд. тех. наук. — Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2010. — 18 с.
3. Анализ существующих способов формирования соединения и основные требования к качеству при сборке шаровых шарниров передней подвески автомобилей / Ю. В. Калмыков, И. А. Михайловский, В. В. Сальников и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. — 2009. — № 4. — С. 47–50.
4. Развитие процессов ОМД в производстве автокомпонентов / В. И. Куцендик, И. Г. Гун, И. А. Михайловский и др. // New Technologies and Achievements in Metallurgy, Material Engineering and Production Engineering: XIV International Scientific Conference. — Series: monographs № 31. — Czestochowa, 2013. — P. 309–316.
5. Разработка, моделирование и совершенствование процессов ОМД при производстве шаровых шарниров автомобилей / И. Г. Гун, И. А. Михайловский, Д. С. Осипов и др. // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: сб. науч. тр. — Екатеринбург, 2013. — С. 621–625.
6. Улучшение качества автокомпонентов за счёт совершенствования технологических процессов / И. Г. Гун, В. И. Куцендик, Д. С. Осипов и др. // Качество в производственных и социально-экономических системах: материалы междунар. науч.-тех. конф. — Курск: ЮЗГУ, 2013. — С. 82–85.