

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 62.23

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-23-31



РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ НАЧАЛА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ИЗГИБЕ ПАЛЬЦА ШАРОВОГО НАРУЖНОГО РУЛЕВОГО НАКОНЕЧНИКА АВТОМОБИЛЯ ПОСРЕДСТВОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Гун И.Г.¹, Вахитов А.Р.², Столяров Ф.А.², Смирнов А.В.¹, Михайловский И.А.²

¹АО НПО «БелМаг», Магнитогорск, Россия

²Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Шаровые шарниры подвески и рулевого управления автомобиля являются ответственными узлами, поскольку потеря их работоспособности влечет возникновение аварийных ситуаций с угрозой безопасности потребителя. В связи с этим шаровые шарниры подвески и рулевого управления автомобиля должны соответствовать комплексу технических требований, регламентированных в различных нормативных документах. В России требования к шаровым шарнирам автомобиля регламентируются ГОСТ Р 52433 и Техническим Регламентом Таможенного Союза ТР ТС 018/2011. Следует отметить, что данные стандарты являются наиболее общими документами, где требования к прочности, функциональности и эксплуатационной надежности отражены не в полном объеме. Руководствуясь лишь этими стандартами, существует вероятность упустить важные параметры при проектировании деталей или узлов, что может привести к потере или частичной потере работоспособности изделий. Наряду с этим заказчики OEM-уровня предъявляют дополнительные требования к готовой продукции. Одним из таких параметров является требование к усилию начала пластической деформации при изгибе пальца шарового наружного рулевого наконечника автомобиля. **Используемые методы.** В данной статье предлагается расчетное определение вышеупомянутого параметра посредством моделирования процесса статических испытаний с применением метода конечных элементов. **Новизна.** Анализ открытых источников не выявил наличия расчетных методов определения усилия начала пластической деформации шаровых пальцев при изгибе. **Практическая значимость.** Разработанная конечно-элементная модель позволяет определить усилие начала пластической деформации шарового пальца с приемлемой степенью точности на стадии проектирования, что позволяет избежать проведения большого числа физических экспериментов и повысить качество выпускаемой продукции.

Ключевые слова: наружный рулевой наконечник, шаровый палец, усилие начала пластической деформации при изгибе, конечно-элементная модель, заказчик OEM-уровня.

© Гун И.Г., Вахитов А.Р., Столяров Ф.А., Смирнов А.В., Михайловский И.А., 2021

Для цитирования

Расчетное определение усилия начала пластической деформации при изгибе пальца шарового наружного рулевого наконечника автомобиля посредством моделирования процесса статических испытаний / Гун И.Г., Вахитов А.Р., Столяров Ф.А., Смирнов А.В., Михайловский И.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 23–31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-23-31>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

CALCULATION OF STARTING FORCE OF PLASTIC DEFORMATION, WHEN BENDING AN OUTER TIE ROD BALL STUD, BY THE SIMULATION OF STATIC TESTS

Gun I.G.¹, Vakhitov A.R.², Stolyarov F.A.², Smirnov A.V.¹, Mikhailovskiy I.A.²

¹JSC NPO BelMag, Magnitogorsk, Russia

²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Ball joints of a car suspension and steering are critical units, since the loss of their operability entails accidents with a threat to the safety of the user. In this regard, the ball joints of the car suspension and steering shall comply with a set of technical requirements provided by various regulatory documents. In Russia, the requirements for ball joints of a car are set forth by GOST R 52433 and Technical Regulations of the Customs Union TR CU 018/2011. It should be noted that these standards are the most general documents, where the requirements for strength, functionality and operational reliability are not fully reflected. Guided by these standards only, there is a high probability of missing important parameters in the design of parts or assemblies, which may lead to a full or partial loss of a normal operation of products. At the same time, OEM customers have additional requirements for the finished product. One of these requirements is starting force of plastic deformation during bending of an outer tie rod ball stud of a car. **Methods Applied.** This paper describes a proposed calculation of the above mentioned parameter by the simulation of static tests using the finite element method. **Originality.** The analysis of open sources did not reveal any calculation methods for determining starting force of plastic deformation of ball studs during bending. **Practical Relevance.** The developed finite element model makes it possible to determine starting force of plastic deformation of the ball stud with an acceptable degree of accuracy at the design stage to avoid a large number of physical experiments and increase the quality of the manufactured products.

Keywords: outer tie rod, ball stud, starting force of plastic deformation in bending, finite element model, OEM customer.

For citation

Gun I.G., Vakhitov A.R., Stolyarov F.A., Smirnov A.V., Mikhailovskiy I.A. Calculation of Starting Force of Plastic Deformation, When Bending an Outer Tie Rod Ball Stud, by the Simulation of Static Tests. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 23–31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-23-31>

Введение

Шаровые шарниры подвески и рулевого управления автомобилей являются ответственными узлами [1], поскольку потеря их работоспособности влечет появление аварийных ситуаций, сопряженных с угрозой безопасности потребителя. Одним из наиболее ответственных деталей шаровых шарниров подвески и рулевого управления является шаровый палец. Критическим с точки зрения безопасности является излом шарового пальца либо под действием экстремальных сил, превышающих возможности изделия к восприятию нагрузок, либо по причине накопления усталостных повреждений [2]. В процессе эксплуатации шаровый палец испытывает различные по величине и направлению силы, возникающие в направляющем аппарате подвески при движении по опорной поверхности [3]. Поэтому вопрос статической и усталостной прочности шаровых пальцев очень важен при проектировании шаровых шарниров подвески и рулевого управления.

В этой связи шаровые шарниры подвески и рулевого управления автомобиля в нашей стране

должны соответствовать комплексу технических требований, регламентированных в следующих нормативных документах:

1. ГОСТ Р 52433-2005 «Автомобильные транспортные средства. Шарниры шаровые. Технические требования и методы испытаний».

2. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств».

В рамках стандарта ГОСТ Р 52433-2005 в части требований к прочности шарового пальца регламентирована прочность шарового пальца на удар. Прочность шарового пальца на удар определяется на стенде копрового типа или специальном ударном устройстве, обеспечивающем заданную энергию удара. Выбор значения энергии удара производится в зависимости от диаметра сферы шарового пальца, если иное не предусмотрено в конструкторской документации (КД). Следует отметить, что приведенные в ГОСТ значения энергии удара не учитывают параметров самого автомобиля и его подвески. После испытания оценивается степень деформации пальца и наличие трещин

на изгибающихся поверхностях. При деформации пальца после одного удара более 3,5 мм палец бракуют. При деформации от одного удара менее 1,5 мм число ударов не ограничивают. При деформации в пределах от 1,5 до 3,5 мм пальца и появлении трещин на изгибающей поверхности палец бракуют.

В рамках Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 018/2011 в части требований к прочности шарового пальца также регламентирована прочность шарового пальца на удар. Здесь требование носит декларативный характер без указания информации о средствах и методах оценки данного параметра.

Такой параметр, как прочность пальца шарового на удар, позволяет оценить прочность шарового пальца при действии динамической нагрузки, возникающей в подвеске и рулевом управлении автомобиля при экстремальных условиях, но не позволяет оценить прочность и жесткость шарового пальца при действии статической нагрузки. Статическая нагрузка, приводящая к пластической деформации пальца, не приводит к его излому, но к деформированному пальцу нужно приложить меньшую энергию до его долома в сравнении с недеформированным пальцем [4]. Также пластическая деформация пальца приводит к нарушению кинематики работы подвески. Таким образом, статические испытания позволяют оценить частичную потерю работоспособности.

Также следует отметить, что ГОСТ Р 52433-2005 и Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 являются общими документами. Руководствуясь лишь требованиями этих стандартов, существует вероятность того, что при проектировании возможно упустить важные параметры, что может привести к потере или частичной потере работоспособности изделий.

Технические спецификации заказчиков OEM-уровня (общ. Original Equipment Manufacturer – «оригинальный производитель оборудования», в данном случае – «производитель автомобилей») представляют собой комплекс технических требований и методов испытаний, регламентирующих как прочностные, так и функциональные, эксплуатационные и другие требования. Выполнение требований спецификаций позволяет производителю выпускать более конкурентную продукцию на современном глобальном рынке.

Определение усилия начала пластической деформации при изгибе пальца шарового

Одним из требований технических спецификаций к наружному рулевому наконечнику автомобиля является определение параметров статического изгиба пальца шарового, в частности усилия начала пластических деформаций по диаграмме сила-перемещение. При этом палец закрепляется в специальной оснастке с заданным моментом затяжки, которая является либо частью реальной детали автомобиля (поворотного кулака или рычага), либо деталью с максимально близкими к реальным геометрическим размерами и механическими свойствами. После чего нагруженное устройство перемещается в направлении, перпендикулярном оси пальца, и передает нагрузку на сферу шарового пальца, как показано на схеме статических испытаний шарового пальца на изгиб (рис. 1). При этом записывается диаграмма сила-перемещение.

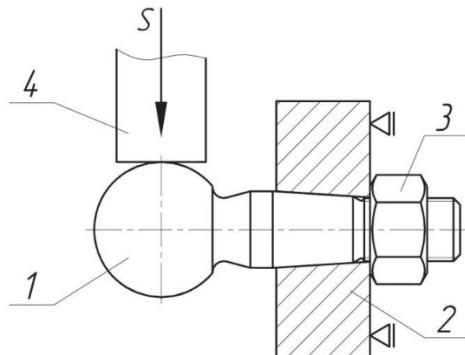


Рис. 1. Схема статических испытаний шарового пальца на изгиб: 1 – палец шаровый; 2 – оснастка; 3 – гайка; 4 – нагруженное устройство; S – направление перемещения нагруженного устройства

Fig. 1. Static bending tests of the ball stud: 1 is a ball stud; 2 is tooling; 3 is a nut; 4 is a loading device; S is a displacement direction of the loading device

Оценка усилия начала пластической деформации $F_{\text{пл}}$ по полученной диаграмме сила-перемещение осуществляется путем построения прямой, проходящей через две точки линейного участка полученной кривой. Ординаты указанной прямой являются значениями 20 и 80% от требуемого минимального по конструкторской документации (КД) значения усилия начала пластической деформации $F_{\text{пл}}^{\min}$. Усилие начала пластической деформации $F_{\text{пл}}$ определяется точкой пересечения построенной прямой с экспериментальной кривой изгиба (рис. 2).

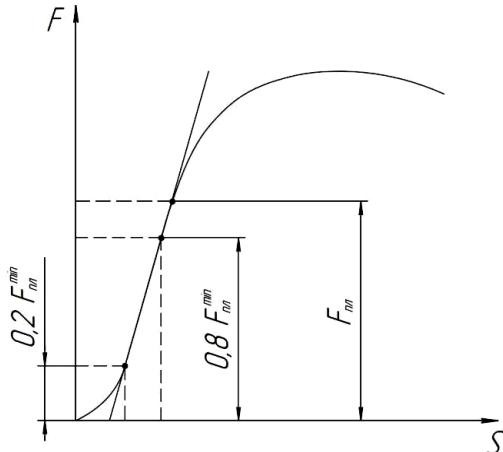


Рис. 2. Определение силы в момент начала пластических деформаций при испытании шаровых пальцев на изгиб: $F_{\text{пл}}^{\min}$ – требуемое минимальное по конструкторской документации (КД) значение усилия начала пластической деформации; $F_{\text{пл}}$ – усилие начала пластической деформации

Fig. 2. Determination of the force at the starting moment of plastic deformations, when testing ball studs for bending: $F_{\text{пл}}^{\min}$ is the required minimum initial value of plastic deformation according to the design documentation; $F_{\text{пл}}$ is starting force of plastic deformation

На стадии проектирования закономерно возникает вопрос определения усилия начала пластических деформаций расчетным способом без изготовления большого числа прототипов для экспериментальных исследований.

В открытых источниках предлагается расчет пальца на прочность по допускаемым напряжениям [3]. В опасных сечениях I-I и II-II (рис. 3) напряжения изгиба под действием указанной в КД максимальной изгибающей силы F , линия действия которой проходит через центр сферической головки, не должны превышать допускаемых напряжений на стали пальца шарового:

$$\sigma_{\text{и I-I}} = \frac{M_{\text{и I-I}}}{W_{\text{и I-I}}} = \frac{32 \cdot F \cdot l_{\text{изг-1}}}{\pi \cdot d_2^3} \leq [\sigma]; \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{и II-II}} = \frac{M_{\text{и II-II}}}{W_{\text{и II-II}}} = \frac{32 \cdot F \cdot l_{\text{изг-2}}}{\pi \cdot d_{\text{бк}}^3} \leq [\sigma], \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{и I-I}}$ и $\sigma_{\text{и II-II}}$ – напряжения шарового пальца при изгибе в сечениях I-I и II-II соответственно; $M_{\text{и I-I}}$ и $M_{\text{и II-II}}$ – изгибающий момент в сечениях I-I и II-II соответственно; $W_{\text{и I-I}}$ и $W_{\text{и II-II}}$ – момент сопротивления сечения изгибу; $l_{\text{изг-1}}$ – плечо изгибающей силы (расстояние от центра шаровой головки до сечения I-I); $l_{\text{изг-2}}$ – плечо изгибаю-

щей силы (расстояние от центра шаровой головки до базового диаметра конуса или до сечения II-II); $d_{\text{бк}}$ – базовый диаметр конуса пальца; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала при изгибе.

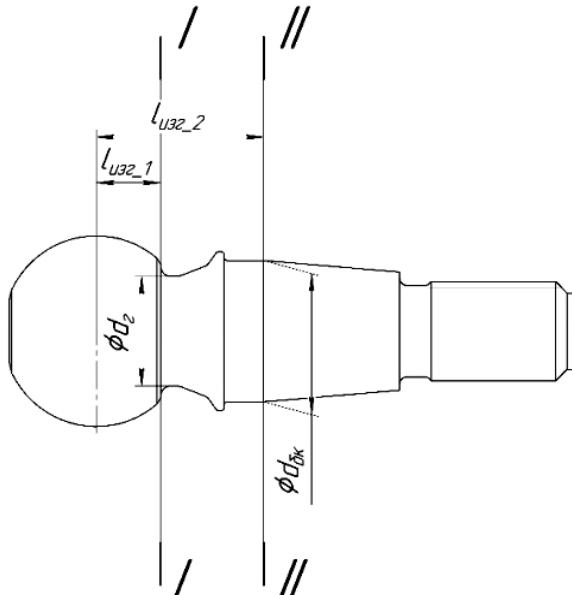


Рис. 3. Схема опасных сечений пальца шарового: $l_{\text{изг-1}}$ – расстояние от центра шаровой головки до сечения I-I; $l_{\text{изг-2}}$ – расстояние от центра шаровой головки до базового диаметра конуса или до сечения II-II; $\varnothing d_{\text{бк}}$ – базовый диаметр конуса пальца; $\varnothing d_2$ – диаметр галтели пальца шарового

Fig. 3. Dangerous sections of the ball stud:

$l_{\text{изг-1}}$ is a distance from the center of the ball head to section I-I, $l_{\text{изг-2}}$ is a distance from the center of the ball head to the base diameter of the cone or to section II-II, $\varnothing d_{\text{бк}}$ is a base diameter of the stud cone, $\varnothing d_2$ is a diameter of the fillet of the ball stud

Разработка конечно-элементной модели

Существенным недостатком расчета по допускаемым напряжениям является отсутствие возможности построения диаграммы сила-перемещение. Для расчетного определения усилия начала пластических деформаций предлагается смоделировать процесс статических испытаний в соответствии со схемой испытаний (см. рис. 1) с использованием метода конечных элементов с учетом физической и геометрической нелинейностей [2, 5].

В конечно-элементной модели (КЭМ) приняты следующие допущения [2, 5]:

- рассмотрена 1/2 часть шарового пальца с граничными условиями симметрии, так как задача является симметричной относительно продольной плоскости пальца шарового;

- упругопластическое поведение материала пальца шарового описывается билинейной диаграммой напряжения-деформации [6]. Материал оснастки, гайки и нагружочного устройства описывается линейной диаграммой напряжения-деформации. Свойства материалов представлены в табл. 1;

- резьбовое соединение палец-гайка смоделировано «склеенным» контактом двух цилиндрических поверхностей согласно принципу Сен-Венана [4].

Конечно-элементная сетка шарового пальца, гайки, оснастки и нагружочного устройства реализована в виде объемных восьмиузловых гексаэдров с тремя степенями свободы в узле для вычисления действующих силовых факторов и перемещений, а также одну точку интегрирования в центре гексаэдра для определения напряжений и деформаций. В модель введены балочные элементы типа RBE2 для определения искомого усилия.

КЭМ содержит следующие граничные условия [2, 5]:

- условие симметрии;
- заделки в узлах балочного элемента, ограничивающей перемещения вдоль трёх осей координат и вращения вокруг них;
- контакт поверхностей (палец-оснастка, палец-нагружочное устройство, оснастка-гайка), реализующий метод штрафных функций;
- статический и кинетический коэффициенты трения 0,2 и 0,1 соответственно [7, 8]. Графическое представление коэффициентов трения представлено на рис. 4;
- принудительное перемещение узлов, находящихся на свободной поверхности нагружочного устройства.

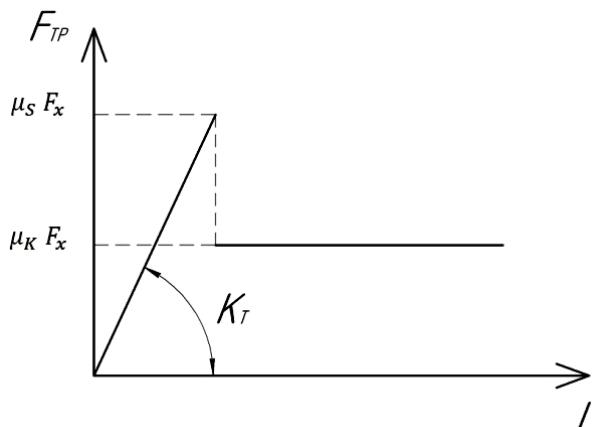


Рис. 4. Графическое представление коэффициентов трения: $\mu_s \cdot F_x$ – статическая сила трения; $\mu_k \cdot F_x$ – кинетическая сила трения; K_T – жесткость контакта

Fig. 4. Friction coefficients: $\mu_s \cdot F_x$ is static friction force, $\mu_k \cdot F_x$ is kinetic friction force, K_T is contact stiffness

Для верификации расчетной модели были отобраны 6 пальцев шаровых, максимально близких по геометрическим размерам с расчетной моделью. Произведены статические испытания на изгиб с записью диаграммы сила-перемещение.

Напряженно-деформированное состояние пальца шарового приведено на рис. 5, 6.

График сравнения расчетной зависимости силы от перемещения центра сферы и экспериментальных кривых изгиба пальцев шаровых представлен на рис. 7.

Как видно из графика, наклон линейных участков кривых, отличается в силу того, что при расчете не учитывается податливость нагружочного устройства и резьбового соединения [9].

Таблица 1. Свойства материалов
Table 1. Material properties

Объект	Твердость HRC	Твердость НВ, кгс/мм ²	Модуль упругости E, МПа	Коэффициент Пуассона μ	Предел текучести σ_t , МПа	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение d_5	Модуль упрочнения H, МПа
Палец шаровый	37	344	$2 \cdot 10^5$	0,30	997	1150	0,2	761
Оснастка	-	-	$2 \cdot 10^5$	0,30	-	-	-	-
Гайка	-	-	$2 \cdot 10^5$	0,30	-	-	-	-
Нагружочное устройство	-	-	$2 \cdot 10^5$	0,30	-	-	-	-

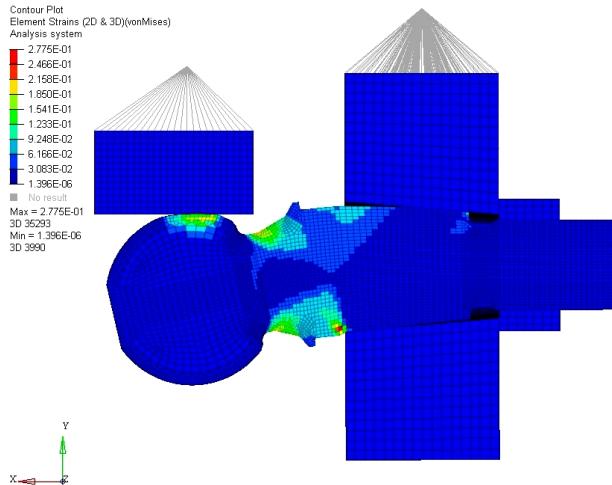


Рис. 5. Картина деформаций пальца шарового
Fig. 5. Deformations of the ball stud

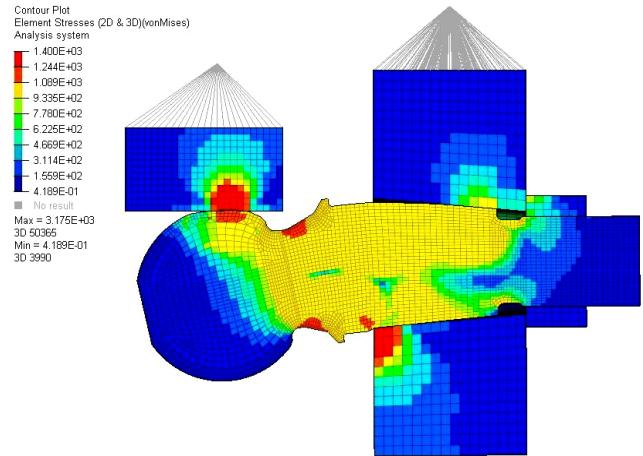


Рис. 6. Картина напряжений по Мизесу пальца шарового
Fig. 6. Von Mises stress of the ball stud

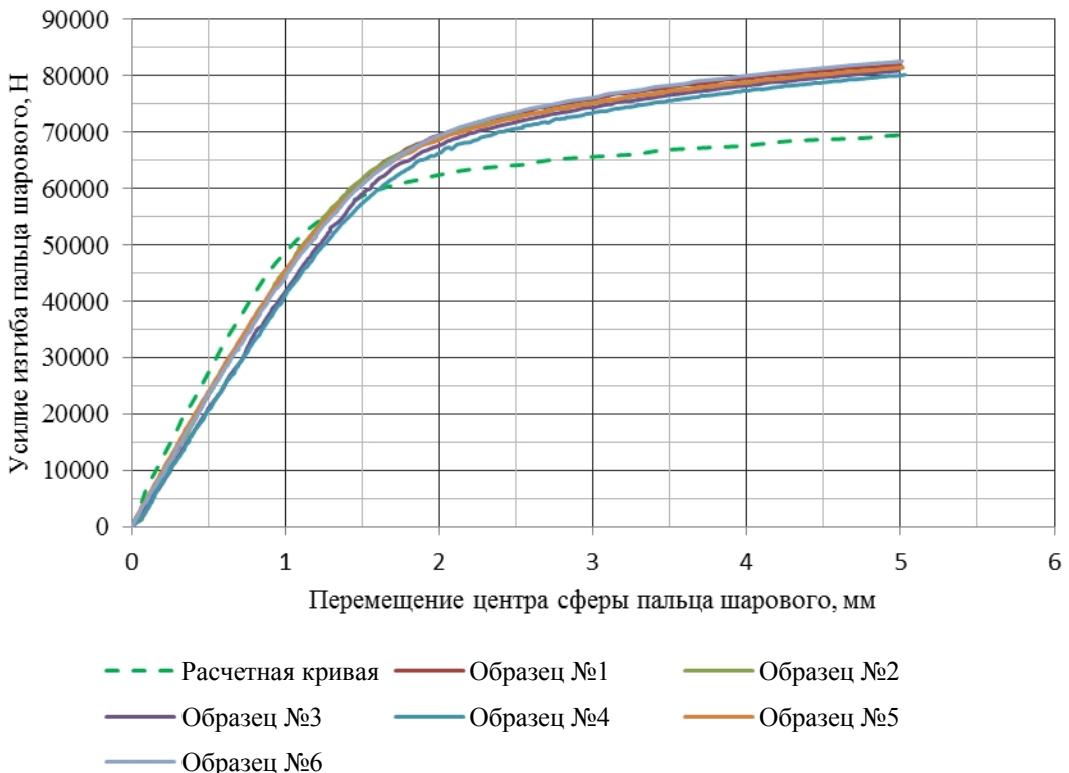


Рис. 7. График сравнения расчетной зависимости силы от перемещения центра сферы и экспериментальных кривых изгиба пальцев шаровых
Fig. 7. Comparison between the calculated dependence of force on the displacement of the center of the sphere and the experimental bending curves of the ball studs

Оценка полученных результатов и их обсуждение

Произведем оценку полученных экспериментальных значений усилий начала пластической деформации для функции распределения Вейбулла [10], поскольку указанные характеристики являются непрерывными.

Функция плотности вероятности имеет вид

$$f(F_{\text{пл}}) = \beta \frac{F_{\text{пл}}^{\beta-1}}{\eta^\beta} e^{-\left(\frac{F_{\text{пл}}}{\eta}\right)^\beta}, \quad (3)$$

где $F_{\text{пл}}$ – усилие начала пластической деформации; η – параметр масштаба распределения Вейбулла; β – параметр формы распределения Вейбулла.

Функция распределения Вейбулла имеет вид

$$F(F_{\text{пл}}) = 1 - e^{-\left(\frac{F_{\text{пл}}}{\eta}\right)^{\beta}}. \quad (4)$$

По результатам анализа экспериментальных значений параметр масштаба составил $\eta = 20,11$, параметр формы $\beta = 45841,51$.

Таблица 2. Полученные в результате эксперимента и расчета значения усилий начала пластической деформации пальца шарового при изгибе

Table 2. Starting forces of plastic deformation of the ball stud during bending determined as a result of the experiment and the calculation

Номер образца	Усилие начала пластической деформации (эксперимент), Н	Усилие начала пластической деформации (расчет), Н	Относительная погрешность, %
№1	45000	43100	3,6
№2	44000		
№3	48500		
№4	46500		
№5	42000		
№6	42200		
Среднее значение	44700		3,1
Значение, соответствующее 50% вероятности возникновения начала пластической деформации	44484		

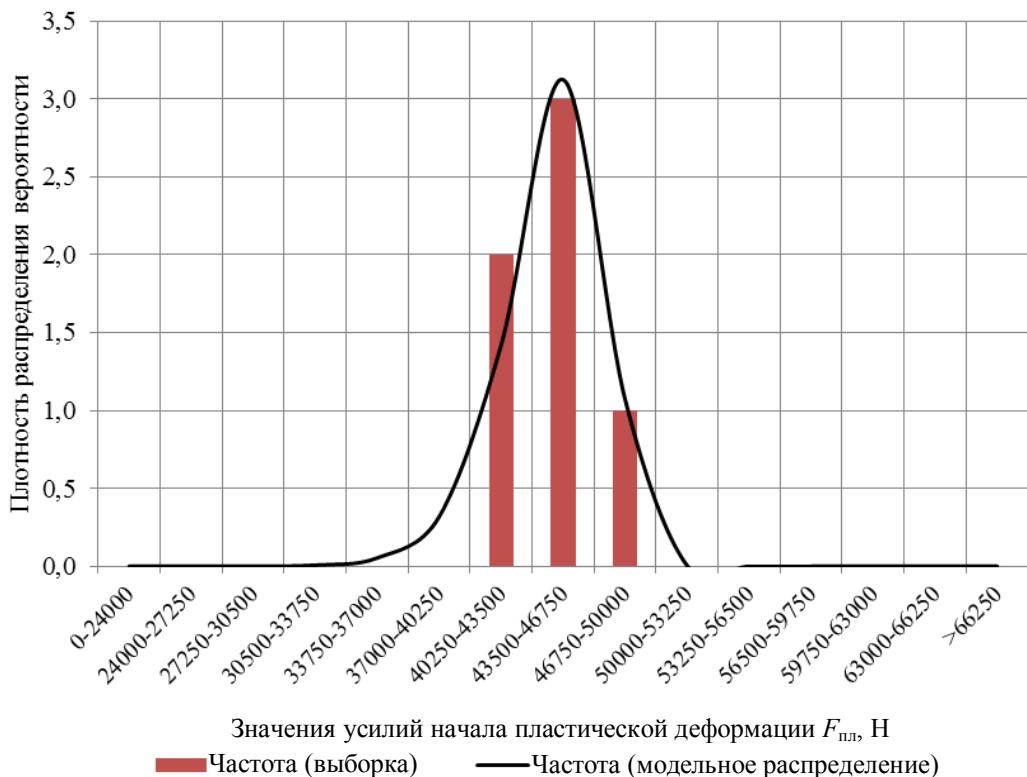


Рис. 8. Сравнение частотной гистограммы и нормированной плотности вероятности модельного распределения Вейбулла

Fig. 8. Comparison of the frequency histogram and the rated Weibull probability density function of the model

В табл. 2 приведены полученные в результате эксперимента и расчета значения усилий начала пластической деформации пальца шарового при изгибе.

На рис. 8 приведено сравнение частотной гистограммы и нормированной плотности вероятности модельного распределений Вейбулла.

Заключение

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- Ввиду неполноты технических требований к шаровым шарнирам подвески и рулевого управления автомобилей, изложенных в действующей на территории России нормативно-технической документации и с целью повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции целесообразно использовать в качестве дополнительных требования технических спецификаций заказчиков OEM-уровня, поскольку при проектировании возможно упустить важные параметры, что может привести к потере или частичной потере работоспособности изделий.

- Разработанная КЭМ процесса статического испытания пальца шарового на изгиб позволяет определять усилие начала пластической деформации пальцев шаровых передней подвески и рулевого управления автомобилей с приемлемой степенью точности без большого объема проведения экспериментальных работ с физическими объектами. Сравнение расчетных и экспериментальных данных доказало адекватность разработанной КЭМ с приемлемой точностью.

- Разработанная КЭМ может быть применена для дальнейшего применения в процессе проектирования перспективных изделий.

Список литературы

1. Раймпель Й. Шасси автомобиля: Рулевое управление / пер. с нем. В.Н. Пальянова; под ред. А.А. Гальбрейха. М.: Машиностроение, 1987. 232 с.: ил.
2. Расчетное определение показателей прочности шаровых шарниров элементов шасси автомобиля путем моделирования процесса статических испытаний / И.А. Михайловский, И.Г. Гун, В.В. Сальников, В.И. Кущепендик, Е.И. Гун., Д.С. Вдовин // Журнал автомобильных инженеров. 2014. № 2(85). С. 20–24.
3. Проектирование полноприводных колесных машин: учебник для вузов: В 3 т. Т. 3 / Б.А. Афанасьев, Б.Н. Белоусов, Л.Ф. Жеглов и др.; под ред. А.А. Полунгина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 432 с.: ил.
4. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с. (Сер. Механика в техническом университете. Т. 2).
5. Моделирование процесса опрессовки внутренних рулевых наконечников / Гун Е.И., Вахитов А.Р., Сальников В.В., Гун И.Г., Хон Ортуэта, Агустин Анита // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 46–52.
6. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. М.: Машиностроение, 1979. 191 с.: ил.
7. Расчетное определение параметров модели кулоновского трения посредством моделирования процесса опрессовки внутреннего рулевого наконечника автомобиля / Гун И.Г., Вахитов А.Р., Столяров Ф.А., Михайловский И.А., Смирнов А.В. // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. Том 19. № 2. С. 90–94.
8. MDPI and ACS Style Peng, Y.; Li, J.Q.; Zhan, Y.; Wang, K.C.P.; Yang, G. Finite Element Method-Based Skid Resistance Simulation Using In-Situ 3D Pavement Surface Texture and Friction Data. Materials 2019, 12, 3821.
9. Шаровые шарниры шасси: совершенствование конструкций, технологий, методов оценки качества: монография / И.А. Михайловский, И.Г. Гун, Е.И. Гун, Е.Г. Касаткина. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 201 с.
10. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. 9-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2003. 579 с.: ил.

References

1. Reimpell J. *Shassi avtomobilya: Rulevoe upravlenie* [Car chassis: Steering]. Translated from German by Palyanov V.N., ed. by Galbreikh A.A. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 232 p. (In Russ.)
2. Mikhailovskiy I.A., Gun I.G., Salnikov V.V., Kutsependik V.I., Gun E.I., Vdovin D.S. Calculation of the strength indicators of ball joints of the vehicle chassis elements by simulating a static test process. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov* [Journal of Automotive Engineers], 2014, no. 2(85), pp. 20–24. (In Russ.)
3. Afanasev B.A., Belousov B.N., Zheglov L.F. et al. *Proektirovanie polnoprivednykh kolesnykh mashin: Uchebnik dlya vuzov* [Design of all-wheel drive vehicles: textbook for higher education institutions]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2008, 432 p. (In Russ.)
4. Feodosev V.I. *Soprotivlenie materialov. Uchebnik dlya vuzov* [Strength of materials: textbook for higher education institutions]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 1999, 592 p. (In Russ.)
5. Gun E.I., Vakhitov A.R., Salnikov V.V., Gun I.G., Jon Ortueta, Agustin Anita. Simulation of the axial joint pressing process. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2019, vol. 17, no. 1, pp. 46–52. (In Russ.)
6. Markovets M.P. *Opredelenie mekhanicheskikh svoystv metallov po tverdosti* [Determination of the mechanical properties of metals by hardness]. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 191 p. (In Russ.)
7. Gun I.G., Vakhitov A.R., Stolyarov F.A., Mikhailovskiy I.A., Smirnov A.V. Calculation of parameters for a Cou-

- lomb friction model by the simulation of a rod end pressing process. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank Production in the Machine Industry], 2021, vol. 19, no. 2, pp. 90–94. (In Russ.)
8. Peng Y., Li J.Q., Zhan Y., Wang K.C.P., Yang G. Finite element method-based skid resistance simulation using in-situ 3D pavement surface texture and friction data. *Materials*, 12, 3821 (2019).
9. Mikhailovskiy I.A., Gun I.G., Gun E.I., Kasatkina E.G. *Sharovye sharniry shassi: sovershenstvovanie kon-* struktsii, tekhnologii, metodov otsenki kachestva: monografija [Ball joints of the chassis: improving designs, technologies, quality assessment methods: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, 201 p. (In Russ.)
10. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: ucheb. posobie dlya vuzov* [Probability theory and mathematical statistics: study guide for higher education institutions], 2003, 579 p. (In Russ.)

Поступила 11.05.2021; принята к публикации 25.05.2021; опубликована 28.06.2021
Submitted 11/05/2021; revised 25/05/2021; published 28/06/2021

Гун Игорь Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, генеральный директор, АО НПО «БелМаг», Магнитогорск, Россия.

Email: goun@belmag.ru. ORCID 0000-0002-6201-661X

Вахитов Александр Рафаэльевич – аспирант,

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: vakhitov_aka47@mail.ru. ORCID 0000-0001-7299-2035

Столяров Федор Алексеевич – студент,

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: stolyarov.f.a@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7785-8417

Смирнов Алексей Вячеславович – кандидат технических наук, начальник отдела по развитию поставщиков, АО НПО «БелМаг», Магнитогорск, Россия.

Email: alexey.smirnov@belmag.ru. ORCID 0000-0003-4321-5012

Михайловский Игорь Александрович – доктор технических наук, профессор,

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: tssa@magtu.ru. ORCID 0000-0001-7479-0349

Igor G. Gun – DrSc (Eng.), professor,
CEO, JSC NPO BelMag, Magnitogorsk, Russia.
Email: goun@belmag.ru. ORCID 0000-0002-6201-661X

Alexander R. Vakhitov – postgraduate student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: vakhitov_aka47@mail.ru. ORCID 0000-0001-7299-2035

Fedor A. Stolyarov – student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: stolyarov.f.a@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7785-8417

Aleksei V. Smirnov – PhD (Eng.), Head of the Supplier Development Department,
JSC NPO BelMag, Magnitogorsk, Russia
Email: alexey.smirnov@belmag.ru. ORCID 0000-0003-4321-5012

Igor A. Mikhailovskiy – DrSc (Eng.), professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: tssa@magtu.ru. ORCID 0000-0001-7479-0349