

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.77

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-46-52>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОПРЕССОВКИ
ВНУТРЕННИХ РУЛЕВЫХ НАКОНЕЧНИКОВГун Е.И.¹, Вахитов А.Р.¹, Сальников В.В.¹, Гун И.Г.¹, Хон Ортуэта², Агустин Анитуа²¹АО НПО «БелМаг», Магнитогорск, Россия²LANBI S.A., Эльгойбар, Страна Басков, Испания

Аннотация. При проектировании процесса опрессовки внутренних рулевых наконечников закономерно возникает вопрос о параметрах этого процесса, которые непосредственно оказывают влияние на характер деформации корпуса, и, в конечном счете, на формирование неразъемного соединения шарового пальца и корпуса наконечника. Таковыми параметрами являются усилие, реализуемое прессом, перемещение пуансона и геометрия матрицы. От правильного выбора указанных параметров зависит качество полученного неразъемного соединения. Соединение считается наиболее рациональным, если вкладыш наконечника будет равномерно обжат: нагрузка будет равномерно распределена по рабочей поверхности вкладыша со стороны сферы шарового пальца и сферической поверхности деформированного корпуса. Для этого пресс должен обеспечить необходимое усилие и перемещение, геометрические параметры матрицы должна обеспечить требуемую форму сформированной части корпуса. Качество полученного неразъемного соединения оценивается на готовом изделии по ряду эксплуатационных характеристик, значения которых должны находиться в приемлемых с точки зрения заказчика интервалах. К эксплуатационным характеристикам относятся такие параметры, как момент сопротивления качанию шарового пальца, момент срагивания при качании шарового пальца, осевой зазор в шарнире и осевая жесткость шарнира. С целью определения указанных параметров без проведения большого объема экспериментальных работ с физическими объектами, была разработана численная модель процесса опрессовки внутренних рулевых наконечников на базе метода конечных элементов. Требуемое усилие пресса, его перемещение и геометрию матрицы предлагается определять по результатам моделирования процесса опрессовки методом конечных элементов. Проведённые экспериментальные исследования позволили сделать вывод об удовлетворительной сходимости результатов разработанной математической модели с экспериментальными данными.

Ключевые слова: внутренний рулевой наконечник, технологическая операция, технологические параметры, матрица, пуансон, эксплуатационные характеристики, конечно-элементная модель, сборочная линия.

Введение

В настоящее время в России ведущими производителями легковых и малотоннажных грузовых автомобилей в подавляющем большинстве случаев применяется реечный рулевой механизм с возвратно-поступательным движением на выходе. Одно из преимуществ данного типа рулевого механизма является возможность установки боковых поперечных тяг с шарнирами на концах к зубчатой рейке. Такое устройство рулевого управления позволяет не применять маятниковый рычаг и среднюю тягу, тем самым обеспечивая возможность разместить рулевое управление в малом объеме [1]. Указанные преимущества обуславливают широкое распространение реечного рулевого управления.

В этой связи растет потребность и в комплектующих привода реечного рулевого управления, в частности внутренних рулевых наконечниках. Общий вид внутреннего рулевого наконечника представлен на **рис. 1**.



Рис. 1. Внутренний рулевой наконечник (общий вид)

Наиболее распространенным типом конструкции внутреннего рулевого наконечника является сферический шарнир (с 3-я вращательными степенями свободы). Неразъемное соединения шарового пальца наконечника и корпуса

© Гун Е.И., Вахитов А.Р., Сальников В.В., Гун И.Г., Хон Ортуэта, Агустин Анитуа, 2019

формируется посредством пластической деформации (опрессовки) корпуса. От качества процесса опрессовки зависит равномерность распределения нагрузки по рабочей поверхности вкладыша со стороны сферы шарового пальца и сферической поверхности сформированного корпуса.

Анализ открытых источников выявил отсутствие какой-либо информации о выборе параметров процесса опрессовки (усилие пресса и перемещение пуансона, геометрия матрицы), которые непосредственно оказывают влияние на характер деформации корпуса наконечника, а следовательно, и на его эксплуатационные характеристики.

В связи с вышеизложенным, актуальной считается задача разработки метода расчётного определения технологических параметров процесса опрессовки на этапе проектирования без проведения большого объема экспериментальных работ с физическими объектами с целью сокращения сроков проектирования и объема доводочных работ.

Методы исследования

Внутренний рулевой наконечник является элементом привода реечного рулевого управления. Он представляет из себя сферический шарнир, обеспечивающий передачу управляющего усилия от зубчатой рейки на поворотную цапфу через наружный рулевой наконечник. При изменении положения поворотного кулака относительно зубчатой рейки шаровой палец отклоняется на необходимый угол качания. Ограничение трех поступательных степеней свободы происходит посредством формирования неразъемного соединения пластическим деформированием корпуса. Конструкция внутреннего рулевого наконечника представлена на **рис. 2**.



Рис. 2. Внутренний рулевой наконечник:
1 – корпус; 2 – опорное кольцо; 3 – вкладыш;
4 – палец шарового

Внутренний рулевой наконечник состоит из корпуса 1, опорного кольца 2, вкладыша 3 и шарового пальца 4.

Указанная конструкция защищена патентом на полезную модель (№ 185066 от 19.11.2018г.) [2].

Сборка наконечника состоит из двух технологических операций: подборки и опрессовки. На первой операции опорное кольцо 2 помещается на дно корпуса 1, затем на опорное кольцо 2 располагается вкладыш 3. Далее внутрь вкладыша заправляется консистентная смазка, после чего во вкладыш 3 вставляется шаровой палец. На **рис. 3** показана схема подборки.

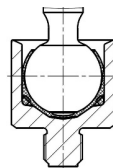


Рис. 3. Схема подборки

За операцией подборки следует операция опрессовки. Подобранное изделие базируется в матрице. Затем пуансон, перемещаясь в осевом направлении, воздействует на плоский торец корпуса, производя его деформацию в матрице. На **рис. 4** показан результат опрессовки внутреннего рулевого наконечника.

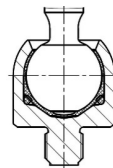


Рис. 4. Результат процесса опрессовки

Качество полученного неразъемного соединения оценивается на готовом изделии по ряду эксплуатационных характеристик, значения которых должны находиться в приемлемых с точки зрения заказчика интервалах. К эксплуатационным характеристикам относятся следующие параметры [3]:

- момент сопротивления качанию пальца;
- момент страгивания при качании пальца;
- осевой зазор в шарнире;
- осевая жесткость шарнира.

Достижение необходимых интервалов значений эксплуатационных характеристик возможно при равномерном обжатии корпусом вкладыша при его деформировании.

О равномерности обжатия корпусом вкладыша можно судить по форме сформирован-

ного корпуса, получившегося в результате моделирования. Наиболее рациональным соединением будет считаться при одновременном выполнении двух критериев:

Критерий №1: Центр внутренней сферической поверхности сдеформированного корпуса должен совпадать с теоретическим положением центра сферы пальца (рис. 5), т.е. размер $\delta \rightarrow 0$.

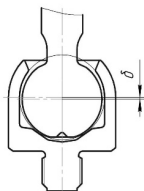


Рис. 5. Размер δ

Критерий №2: Разность между диаметром внутренней цилиндрической поверхности корпуса до деформации и внутренней сферической поверхностью сдеформированного корпуса должна стремиться к 0 (рис. 6, 7), т.е. $d_{k1} - d_{k2} \rightarrow 0$.

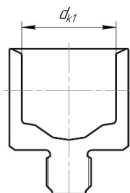


Рис. 6. Диаметр d_{k1}

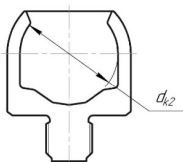


Рис. 7. Диаметр d_{k2}

Задача обеспечения указанных критериев на этапе проектирования посредством выбора указанных технологических параметров была решена для внутреннего рулевого наконечника, который на сегодняшний день входит в состав рулевого управления автомобилей ГАЗель Next и используется при сборке автомобилей на конвейере завода «ГАЗ».

Указанные технологические параметры могут быть определены по результатам моделирования процесса опрессовки внутреннего рулевого наконечника с использованием метода конечных элементов при учете физической и геометрической нелинейностей. Так как детали наконечника и осадка являются телами вращения, рассмотрена 1/12 часть шарнира с граничными условиями симметрии [4]. Расчетная схема представлена на рис. 8.

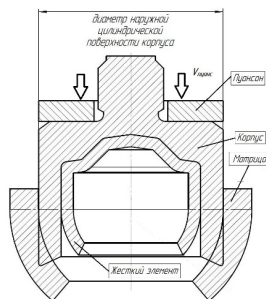


Рис. 8. Расчетная схема

В конечно-элементной модели (КЭМ) приняты следующие допущения:

- рассмотрена 1/12 часть шарнира с граничными условиями симметрии;
- упруго-пластическое поведение материалов описывается билинейной диаграммой напряжения-деформации [4];
- шаровой палец, опорное кольцо и вкладыш представляют собой единый жесткий элемент «палец-опорное кольцо-вкладыш» ввиду того, что наличие вкладыша из высоко-вязкого ацетального гомополимера и резинового опорного кольца в силу меньших по сравнению с корпусом и шаровым пальцем жесткостей не оказывают существенного влияния на процесс опрессовки [4–5]. В рамках проведенных экспериментальных работ справедливость указанного допущения была доказана.

Конечно-элементная сетка шарового пальца, корпуса, элемента «палец-опорное кольцо-вкладыш», пуансона и матрицы 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 для определения усилия опрессовки. Расчетное усилие опрессовки считается равным макси-

мальному значению продольной силы, возникающей в вертикально ориентированном балочном элементе (рис. 9).

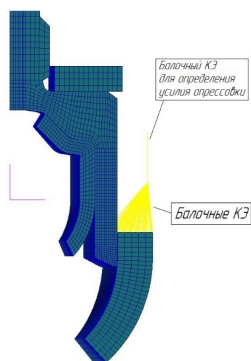


Рис. 9. Конечно-элементная сетка

КЭМ содержала следующие граничные условия:

- условие симметрии;
- заделка в узле балочного элемента, ограничивающая перемещения вдоль трёх осей координат и вращения вокруг них;
- контакт поверхностей (корпуса и матрицы, корпуса и элемента «палец-опорное кольцо-вкладыш», корпуса и пуансона), реализующий метод штрафных функций;
- принудительное перемещение узлов, находящихся на свободной поверхности пуансона.

Геометрические параметры матрицы и перемещение пуансона подбирались итерационно, вплоть до достижения указанных выше критериев. При заданном перемещении пуансона определялось расчетное усилие опрессовки как максимальное значение продольной силы, возникающей в балочном элементе.

Картина деформации приведена на рис. 10.

Для адекватной оценки точности предложенной модели путём сравнения результата моделирования с экспериментальными данными необходимо, чтобы геометрические характеристики деталей КЭМ и их механические свойства соответствовали геометрическим характеристикам и механическим свойствам экспериментальных образцов.

Для этого были отобраны пять корпусов с размерами и свойствами, наиболее близкими к значениям, указанным в процессе моделирования. Механические свойства определялись по поверхностной твердости [6–9]. Процесс опрес-

совки проводился на определенном в результате моделирования перемещении.

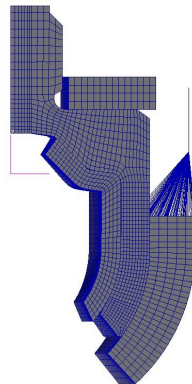


Рис. 10. Картина деформаций

Напряженно-деформированное состояние корпуса приведено на рис. 11.

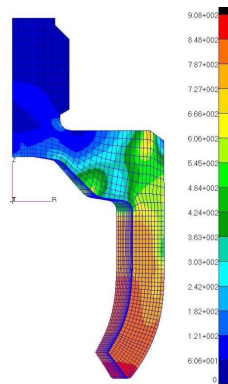


Рис. 11. Картина эквивалентных напряжений по Мизесу

График расчетного усилия опрессовки в зависимости от перемещения пуансона и полученной экспериментальной кривой представлен на рис. 12. На заданном перемещении расчетное усилие опрессовки имеет значение порядка 350 кН.

Полученная форма сдеформированного корпуса шарнира наконечника после опрессовки приведена на рис. 13.

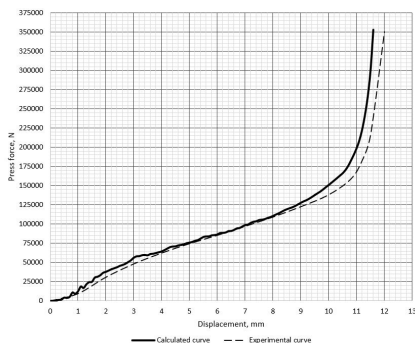


Рис. 12. Расчетная и экспериментальная кривые опрессовки



Рис. 13. Экспериментальный объект

Сравнительные значения указанных критериев на модели и экспериментальных объектах приведены в таблице.

Сравнительные значения критериев оценки качества соединения

Критерий	Значения по результатам моделирования	Экспериментальные значения
δ	0,01–0,03	0,025–0,03
$d_{k1} - d_{k2}$	0,06–0,08	0,07–0,085

Стоит отметить, что полученные значения эксплуатационных характеристик после операции опрессовки для указанных пяти изделий оказались в приемлемых интервалах.

Расчёты, выполненные с использованием разработанной и экспериментально апробированной КЭМ, позволили выбрать технологические параметры процесса опрессовки внутреннего рулевого наконечника, а также оценить напряженно-деформированное состояние корпуса наконечника. Полученная КЭМ будет использована на этапе проектирования перспективных изделий.

Полученное расчетное значение усилия опрессовки позволило выбрать параметры пресса для серийного производства внутренних наконечников ГАЗель Next.

Специалистами АО НПО «БелМаг» было сформулировано техническое задание для компании LANBI S.A. (Spain, Basque Country) с целью проектирования и производства сборочной линии внутренних рулевых наконечников.

Общий вид сборочной линии представлен на рис. 14.



Рис. 14. Общий вид сборочной линии

Сборочная линия включает в себя станции для проведения операций подсорти, опрессовки, маркировки, а также станцию проверки эксплуатационных характеристик на готовом изделии (момента сопротивления качению пальца, момента страгивания при качении пальца, осевой зазор и осевую жесткость в шарнире).

В процессе совместной работы специалистов LANBI S.A. (Spain, Basque Country) при участии специалистов АО НПО «БелМаг» производственная линия апробирована, доведена и успешно запущена в Российской Федерации.

Заключение

По результатам проведённой работы можно сделать следующие выводы:

- разработана КЭМ процесса опрессовки внутренних рулевых наконечников, позволяющая определять параметры технологического процесса на стадии проектирования с приемлемой степенью точности без проведения большого объема экспериментальных работ с физическими объектами;

- сравнение результатов расчетных данных и результатов экспериментов доказало адекватность разработанной КЭМ с точностью, приемлемой для прогнозирования напряженно-деформированного состояния изделия в зависимости от параметров технологического процесса;
- разработанная КЭМ может быть применена при проектировании процесса для перспективных изделий;
- результаты расчета, полученные с помощью разработанной КЭМ, позволили провести сравнительный анализ различных конструктивных исполнений матрицы и выбрать значения ее геометрических параметров, а также параметры пресса для новой сборочной линии;
- основываясь в том числе на результатах расчета, было проведена совместная работа специалистов LANBI S.A. (Spain, Basque Country) при участии специалистов АО НПО «БелМаг» по проектированию, производству, доводке, апробации и запуску новой сборочной линии.

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. Шаровой шарнир: пат. 185066 Рос. Федерация, МПК F16C 11/06 (2006.01) / Гун Игорь Геннадьевич, Калмыков Юрий Вячеславович, Гун Евгений Игоревич, Артюхин Владимир Иванович, Вахитов Александр Рафаэлевич.; заявитель и патентообладатель АО НПО «БелМаг». № 2018105009; заявл. 09.02.2018; опубл. 19.11.2018, Бюл. №32. 4 с.
3. Сальников В.В., Михайловский И.А., Гун И.Г. Моделирование процесса разрушения шарового шарнира пе-

- редней подвески автомобиля при осевом нагружении // Журнал автомобильных инженеров. 2011. №2 (67). С. 51–53.
4. 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. Куцеленик, Е.И. Гун // Журнал автомобильных инженеров. 2014. № 2(85). С. 20–24.
5. Создание и развитие теории квалиметрии металлургии / Гун Г.С., Рубин Г.Ш., Чукин М.В., Гун И.Г., Мезин И.Ю., Корчунов А.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2003. №5. С. 67–69.
6. Гун Г.С., Чукин М.В. Оптимизация процессов технологического и эксплуатационного деформирования изделий с покрытиями. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2006. 324 с.
7. Стенд для испытаний шаровых шарниров: пат. 2263889 Рос. Федерация: МПК G01M 13/00 (2000.01) / Михайловский И.А., Гун И.Г., Ясаков Ю.М., Лапчинский В.В.; заявитель и патентообладатель ЗАО НПО «БелМаг». № 2003137624/11; заявл. 29.12.2003; опубл. 10.11.2005, Бюл. №16. 2 с.
8. Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / Чукин М.В., Корчунов А.Г., Бакинов В.А., Барышников М.П., Гун Г.С., Долгий Д.К., Ефимова Ю.Ю., Колокольцев В.М., Копцева Н.В., Куранов К.Ю., Лебедев В.Н., Мезин И.Ю., Полякова М.А., Чукин В.В.; под общ. ред. М.В. Чукина. М.: Металлургия. 2014. 276 с.
9. Перспективы производства высокопрочного крепежа из заготовок из углеродистых сталей с ультрамелкозернистой структурой / Чукин М.В., Полякова М.А., Рубин Г.Ш., Копцева Н.В., Гун Г.С. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. №1. С. 39–44.

Поступила 26.12.19

Принята в печать 28.01.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-46-52>

SIMULATION OF THE AXIAL JOINT PRESSING PROCESS

Evgeny I. Gun – PhD (Eng.), Deputy Technical Director of Design Development and Tests
AO NPO BelMag, Magnitogorsk, Russia. E-mail: e_goun@belmag.ru

Alexander R. Vakhitov – graduate student, Lead Design Engineer
AO NPO BelMag, Magnitogorsk, Russia. E-mail: vakhitov@belmag.ru

Vitaly V. Salnikov – Deputy Technical Director
AO NPO BelMag, Magnitogorsk, Russia. E-mail: salnikov@belmag.ru

Igor G. Gun – DSc (Eng.), CEO
AO NPO BelMag, Magnitogorsk, Russia. E-mail: goun@belmag.ru

Jon Ortueta – President of LANBI, S.A., Elgoibar
Basque Country, Spain. E-mail: jon.ortueta@lanbi.com

Agustin Anitua – Sales Manager of LANBI, S.A., Elgoibar
Basque Country, Spain. E-mail: agustin.anitua@lanbi.com

Abstract. When designing the axial joint pressing process, a relevant issue is the process parameters which directly influence the nature of the deformation of the housing, and, ultimately, on the formation of an all-in-one connection of a ball stud with a joint housing. These parameters are press force, punch displacement and matrix geometry. The quality of the all-in-one connection depends on a correct selection of the indicated parameters. If the axial joint insert is compressed evenly, the connection will be considered to be the most rational, that is the load will be distributed uniformly over the entire insert surface from the spherical surfaces of the ball stud and the deformed housing. In this way, the press must provide necessary force and displacement; the matrix geometry must provide the required shape of the deformed part of the housing. The all-in-one connection quality is evaluated by a number of operational characteristics of finished products, whose values must be located in intervals acceptable from the customer's point of view. Such characteristics include the following: ball stud rocking resistance torque, breakaway torque at ball stud rocking, axial spring travel and axial stiffness of the joint. In order to determine the specified parameters without many experiments on physical objects, a computer simulation model of the axial joint pressing process based on the finite element method was developed. Required press force, punch displacement and matrix geometry are determined by a computer simulation of the pressing process based on the finite element method. The accomplished experimental research led to the conclusion about acceptable repeatability of the results of the developed mathematical model and experimental data.

Keywords: Axial joint, process operation, process parameters, matrix, punch, operational characteristics, finite element model, assembly line

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. Gun I.G., Kalmykov Yu.V., Gun E.I., Artyukhin V.I., Vakhitov A.R. *Sharovoi shamir* [Ball joint]. Patent RF, no. 185066, 2018.
3. Salnikov V.V., Mikhailovsky I.A., Gun I.G. Simulation of the destruction process of the suspension ball joint of the vehicle under axial loading. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov* [Journal of Automotive Engineers], 2011, no. 2(67), pp. 51-53. (In Russ.)
4. Mikhailovsky I.A., Gun I.G., Salnikov V.V., Kutsependik V. I., Gun E. I. Estimated determination 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.)
5. Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. Metallurgy qualimetry theory design and development. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2003, no. 5, pp. 67-69. (In Russ.)
6. Gun G.S., Chukin M.V. *Optimizatsiya protsessov tekhnologicheskogo i ekspluatatsionnogo deformirovaniya izdeliy s pokrytiyami* [Optimization of technological and operational deformation processes of products with coatings]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2006. 324 p. (In Russ.)
7. Mikhailovsky I.A., Gun I.G., Yasakov Yu.M., Lapchinsky V.V. *Stend dlya ispytaniy sharovykh shamirov* [Stand for testing ball joints]. Patent RF, no. 2263889, 2005.
8. Chukin M.V., Korchunov A.G., Bakshinov V.A., Baryshnikov M.P., Gun G.S., Dolgiy D.K., Efimova Yu.Yu., Kolokoltsev V.M., Koptseva N.V., Kuranov K.Yu., Lebedev V.N., Mezin I.Yu., Polyakova M.A., Chukin V.V. *Proizvodstvo vysokoprotchnoy stalnoy armatury dlya zhelezobetonnykh shpal novogo pokoleniya* [Production of high-strength steel reinforcement for concrete sleepers of a new generation]. Magnitogorsk: Metallurgizdat, 2014. 276 p. (In Russ.)
9. Chukin M.V., Polyakova M.A., Rubin G.Sh., Koptseva N.V., Gun G.S. Prospects for the production of high-strength fasteners from blanks of carbon steel with an ultrafine-grained structure]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Die Forging. Metal Forming], 2014, no. 1, pp. 39-44. (In Russ.)

Received 26/12/19
Accepted 28/01/19

Образец для цитирования

Моделирование процесса опрессовки внутренних рулевых наконечников / Гун Е.И., Вахитов А.Р., Сальников В.В., Гун И.Г., Хон Ор-туэа, Агустин Анитиа // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 46–52. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-46-52>

For citation

Gun E.I., Vakhitov A.R., Salnikov V.V., Gun I.G., Jon Ortueta, Agustin Anitua. 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. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-46-52>