

DOI: 10.12737/article\_5c73fc382e33e6.05913951

<sup>1,\*</sup>Тетерина И.А., <sup>1</sup>Авдеева А.А.<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46

\*E-mail: teterina.ia@bstu.ru

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА КЭ-АНАЛИЗА В ОПРЕДЕЛЕНИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Аннотация.** В данной статье рассмотрен метод реализации конечно-элементных расчетов конструкции устройства. Авторами получены результаты проверки конструкции на прочность, а так же определены конструктивные параметры элементов при соединении деталей путем разогрева. В качестве пакета конечно-элементных расчетов был использован специализированный вычислитель Calculix с лицензией GPL, последовательность применения которого изложена в статье. Для автоматизации вычислений используется сеточный генератор NETGEN 3.0, обеспечивающий быстрое и корректное разбиение исходных объектов на сетку конечных элементов. В качестве примера рассматривается оригинальная конструкция самого ударника, которая содержит стержень и кольцо, смещение которого не допускается. По этой причине требуется его посадка на стержень с натягом. Решение этой задачи и предложено авторами с использованием FEM анализа. Так же с использованием пакета FEM анализа выполнено решение задачи определения прочности стержня ударника, и подбора материала сердечника. При этом выполнялся модальный анализ конструкции, а материал подбирался по пределу прочности из известных марок сталей. В качестве исходных критериев для подбора материала служили результаты анализа напряжений и других деформаций по Р. Мизесу.

**Ключевые слова:** неразъемное соединение, моделирование, точность, деформирование, конечно-элементный анализ, зависимости, статическая прочность, модальный анализ.

**Введение.** Для того чтобы получить неразъемное соединение применяют метод горячей запрессовки. С помощью него можно обеспечить максимальный натяг в соединении (горячая посадка). Суть такой посадки заключается в том, что одна из деталей (охватываемая), входящих в сопряжение, нагревается до температуры, достаточной для свободной посадки на другую (охватываемую) деталь. Необходимая температура нагрева в той или иной степени зависит от габаритов деталей, входящих в соединение, а также от величины требуемого натяга.

**Методология.** В качестве примера приведем изготовление устройства, применяемого для забивания дюбелей. [1], оно имеет стопорное кольцо 1, закрепляемое на хвостовике 2 (рис. 1). Между хвостовиком 2 и стопорным кольцом 1 должен обеспечиваться наибольший натяг для максимальной фиксации их между собой. Также это соединение при работе должно выдерживать ударные нагрузки без деформаций [2].

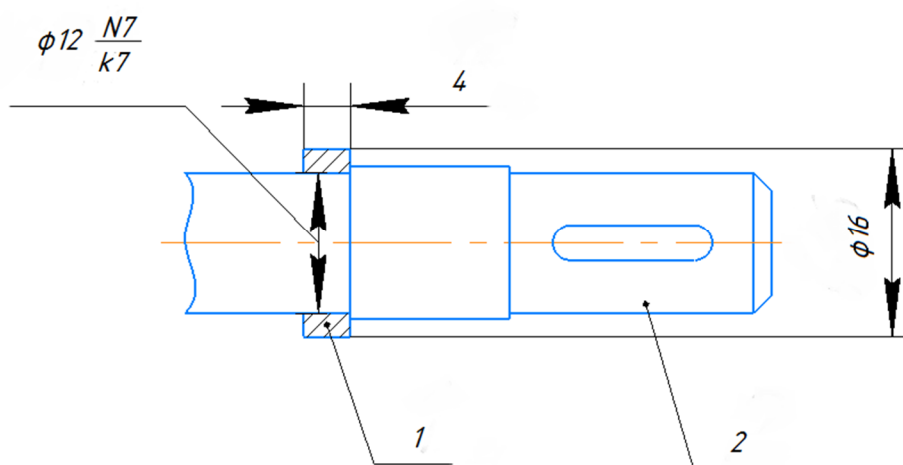


Рис. 1. Эскиз ударника.

Для установки стопорного кольца должна быть обеспечена посадка N7/k7, которая дает максимальный натяг 0,06 мм [3].

Для обеспечения приемлемой точности расчётов было принято решение выполнить моделирование нагрева устанавливаемой детали для различных температур нагрева пакет конечно-элементного анализа.

**Основная часть.** Решение данной задачи осуществляется с помощью средства *FreeCAD* (данная программа представляет собой параметрический 3D-модельер, созданный, прежде всего для создания реальных объектов любого размера) [4, 5, 6]. А сами результаты термомеханического анализа будут выводиться с помощью специализированного вычислителя *Calculix* [7] методом КЭ (конечно-элементного) анализа. Метод основывается на разбиении поверхности на совокупность типовых элементов, называемые конечными.

Перед началом термомеханического анализа необходимо задать все параметры для расчета.

В оболочке *FreeCAD* создаем сначала по заданным размерам эскиз стопорного кольца с хвостовиком, по которым следующим этапом делаем его модель.

Следующим действием требуется задать материал, в рассматриваемой задаче ориентировочно возьмем – Сталь 45, имеющая характеристики, описанные в и коэффициент температурного расширения в зависимости от температуры

нагрева варьируется в пределах от  $14,2 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  до  $15,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Важным атрибутом расчета методом конечных элементов является сетка конечных элементов, от её корректности зависит достоверность результатов вычислений. Точность построения конечно-элементной модели зависит от используемого программного обеспечения. Для получения требуемой точности воспользуемся утилитой *GMsh*.

Так как габариты сборочной единицы малы, то и шаг сетки можно выбрать небольшой, например,  $7,40 \times 2,90$  мм. Иначе могут возникнуть проблемы в расчете, в связи с тем, что процессору придется обрабатывать большой поток информации и чаще всего якобианы нескольких элементов модели оказываются меньше или равными 0.

При термомеханическом анализе необходимо задать температуры. Для ограничения начальной температуры задаем приблизительно равной температуре окружающей среды 300 К. В качестве конечной (максимальной) задаем пять разных температур, для сравнения конечных результатов: первая – 500 К, вторая – 600 К; третья – 700 К; четвертая – 800 К; пятая – 900 К.

Для вычисления смещений в исследуемом объекте вычислитель, по умолчанию, использует метод решения системы нелинейных уравнений в частных производных – Ньютона-Рафсона. Результаты получаются в виде цветовой схемы (рис. 2), где цветами, согласно легенде показаны смещения поверхностей детали в мм.

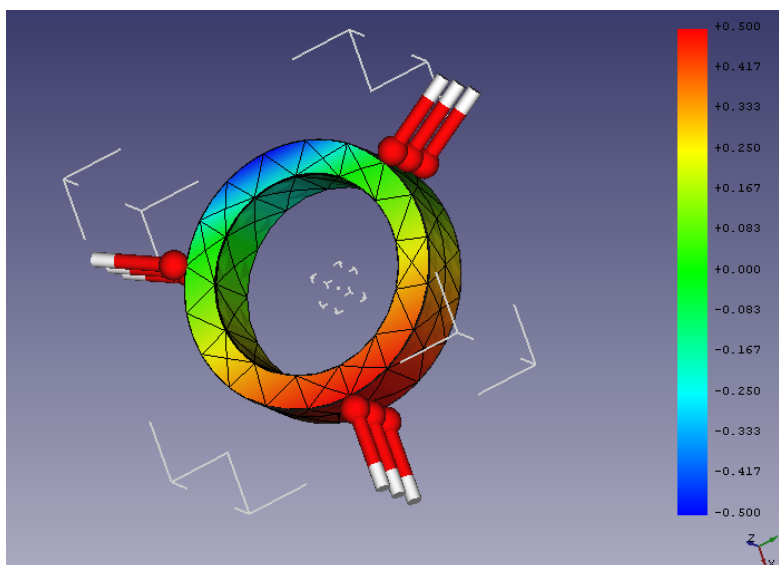


Рис. 2. Смещения в детали при нагреве

Результаты расчётов для всех значений используемых температур удобно представить в виде графика (рис. 3). График построен с использованием офисного пакета *EXCEL*. Согласно графику функции изменения диаметра от температуры имеет аперриодический характер и не может

быть отражена известными простыми зависимостями, что говорит он точности вычислений при моделировании, но интерполяция её в известную простую функцию позволяет получить зависимости, позволяющие выполнить расчёты и для других геометрических размеров.

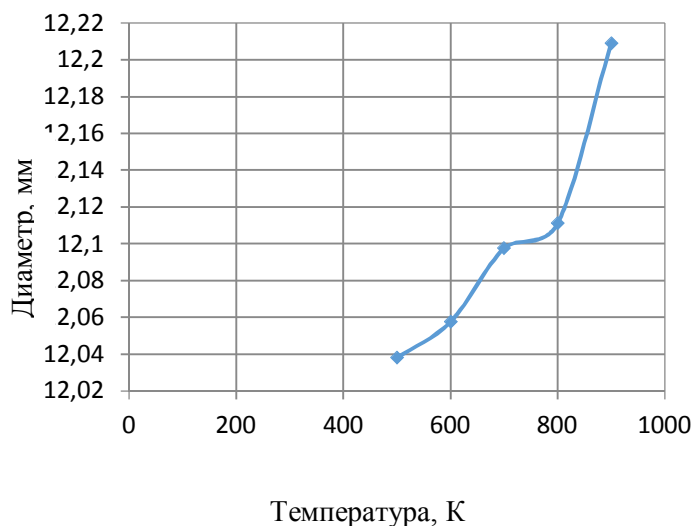


Рис. 3. График зависимости внутреннего диаметра кольца от температуры нагрева

Установка кольца с найденной температурой нагрева показала применимость результатов

исследований для практического использования (рис.4).



Рис. 4. Приспособление с установленным кольцом

Так как при нагреве кольцо должно не только компенсировать требуемый натяг 0,06 мм (для обеспечения посадки N7/k7), а также обеспечение свободного прохождения через буртик высотой 0,05 мм. Экспериментальным путем было установлено, что наиболее подходящая температура, для реализации заданного условия, является 800 К.

Создание современного оборудования на этапе проектирования не заканчивается только его геометрическим моделированием. Выпуск конкурентоспособной продукции не может быть реализован без разностороннего инженерного анализа проектируемого объекта. Поэтому все разработчики мира трудятся над тем, чтобы их конструктивные решения обеспечивали статическую прочность и жесткость, долговечность, устойчивость и подходящие динамические характеристики. Инструменты CAE-анализа дают возможность современным предприятиям создавать продукцию, не уступающую лучшим мировым образцам и даже их превосходящую.

Обсуждение. Следующим этапом, после получения неразъемного соединения кольца и хвостовика, является исследование конструкции на статическую прочность и способность выдерживать динамические нагрузки (частотные).

Расчеты на статическую прочность могут осуществляться с использованием конечно-элементного моделирования. Они позволяют конструктору на любом из этапов проектирования изделия решить задачи прочностных расчетов. Которые в дальнейшем позволят повысить механические характеристики изделия. Одна из таких задач заключается в нахождении наиболее уязвимых мест конструкции и в ходе проектирования оптимизировать ее. Следующая задача заключается в определении максимального значения напряжений компонентов в материале, опираясь при этом на различные теории прочности по отношению максимальных расчетных к максимальному допускаемому значению напряжений [8].

Производимый модальный (частотный) анализ, позволяет определить параметры колебаний конструкций [9, 10, 11]. Полученные результаты представляются в виде значений собственных частот и формы колебаний. Данный расчет служит также основой для других более подробных динамических расчетов (отклик системы на гармонические колебания и нестационарный динамический расчет). При действии внешних периодически изменяющихся сил, входе гармонического анализа, определяется напряженно-деформированное состояние конструкции при вынужденных колебаниях. Наиболее опасными являются резонансные колебания, проявляющиеся из-за совпадения частоты внешних сил и собственной частоты конструкции.

Любое проведение *CAE*-анализа основывается на построение 3D-модели исследуемой конструкции. Проектирование осуществляется так же в среде трехмерного моделирования программного обеспечения *FreeCAD*. А получаемые результаты статического и модального анализов будут выводиться посредством, уже известным нам, свободного программного пакета – *Calculix*. Который в свою очередь предназначен для решения различных задач механики линейной и нелинейной конфигурации.

За основу примем модель, построенную ранее. Неразъемное соединение, полученное методом горячей запрессовки кольца на хвостовик ударника. Помимо стопорного кольца 1, которое установлено с требуемым натягом на хвостовик ударника 2 (рис. 1). При работе изделие кольцо испытывает большие ударные нагрузки со стороны упорной пружины (рис. 2) [1]. Противоположным торцом оно опирается в буртик, который является дополнительной фиксацией и уменьшает вероятность смещения кольца в осевом направлении относительно хвостовика.

Цель исследования сводится к определению прочности изделия, ее способность не деформироваться при приложении больших по величине ударных и статических нагрузок [2]. Из теории прочности известно, что нагруженный материал начинает повреждаться в тех местах, в которых напряжение по Мизесу становится равным предельному напряжению (в качестве предельного напряжения часто принимают предел прочности). Следовательно, требуется подобрать такой материал, который будет наиболее удовлетворять по максимальному предельному напряжению. И такой, в котором при приложении значительной по величине нагрузки не будут наблюдаться пластические деформации.

На основе, описанной выше, трехмерной модели изделия можно приступить к конечно-

элементному моделированию. Чтобы предоставленная модель, состоящая из составных элементов, рассматривалась, как цельная конфигурация, необходимо применить по отношению к ней булеву операцию с двумя выбранными формами. После чего можно приступить к следующим этапам моделирования.

Любой новый расчет начинается с создания нового *FEM* анализа [12]. Универсальность такого конечно-элементного анализа заключается в том, что есть возможность реализовать для одной и той же модели несколько расчетов подобных по типу и различных физических задач. Таким образом, после проведения статического анализа для данной конструкции возможно в рамках одной модели провести и модальный анализ.

Важным аспектом при создании модели и проведения анализа – это присвоение твердотельной модели детали материал. Ориентировочно, как и в ранее поставленной задаче, в качестве материала, из которого изготовлено изделие, примем Сталь 45 [13]. От этого напрямую будет зависеть, какие напряжения будут возникать в конструкции при определенной величине нагрузки.

Следующим этапом является задание сетки конечных элементов, выбрав на панели инструментов соответствующую команду (*GMsh* или *NMsh*). От степени дискретизации твердотельной модели напрямую будут зависеть достоверность получаемых значений. Однако разбиение на слишком мелкие элементы значительно увеличивает их количество, что приводит к возникновению системы уравнений большого порядка, сказывающихся на скорости проведения расчета.

Помимо создания КЭ сетки для успешной реализации решения модели необходимо корректно задать все граничные условия. Всегда необходимо задание хотя бы одного фиксированного закрепления. По поверхности соприкосновения двух составных частей системы требуется также задание ограничение контакта между двумя элементами трехмерной модели. Оно определяет фиксированное положение одного фрагмента относительно другого. Данное ограничение накладывается вместе соприкосновения торца стопорного кольца и буртика.

После того, как все условия по закреплению определены, задаются нагружения системы. В контексте рассматриваемой задачи нас интересует только процесс задания распределенной силы вдоль оси ударника против действия упорной пружины на торец стопорного кольца. Ее численное значение составляет 100 Н.

Стопорное кольцо с упором в нее пружиной имеет возможность смещаться под действием приложенной нагрузки. Поэтому необходимо это

учесть, используя параметр *Displacement*. С помощью него задается максимальное смещение пружины.

После присвоения всех необходимых условий и ограничений данная модель полностью определена и, предоставляется возможность провести анализ. Для этого необходимо запустить вычислитель *Calculix*, который произведет расчет на статическую прочность, либо же модальный анализ (рис. 5).

**Выводы.** Установлено, что расчет на статическую прочность не является полным, а показывает только максимальные смещения под дей-

ствием статической нагрузки (рис. 6). А модальный анализ позволяет установить устойчивую динамическую нагрузку, что доказывают результат моделирования. При имеющемся значении нагрузки и заданных параметрах максимальное предельное напряжение по Мизесу будет равно 445,71 МПа.

Сталь 45, предложенная в качестве ориентировочной ранее, имеет предел прочности 600 МПа согласно ГОСТ 1050-2013 [1]. При статической нагрузке полученного напряжения недостаточно для разрушения, и при модальном анализе данная сталь удовлетворяет по максимальному предельному напряжению.

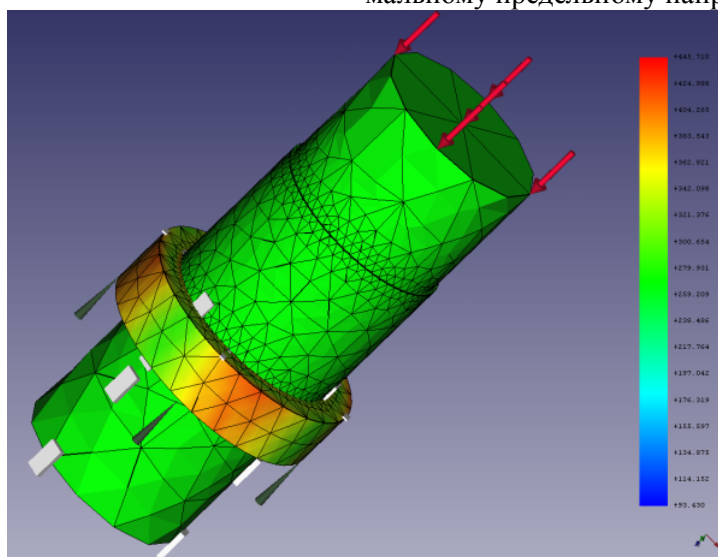


Рис. 5. Результат модального анализа

Таким образом, имея любое значение нагрузки, можно произвести КЭ-анализ. И с помощью результатов модального анализа подо-

брать материал конструкции, который будет удовлетворять всем требованиям по пределу прочности.

Нет ссылки в тексте на рис 5-6

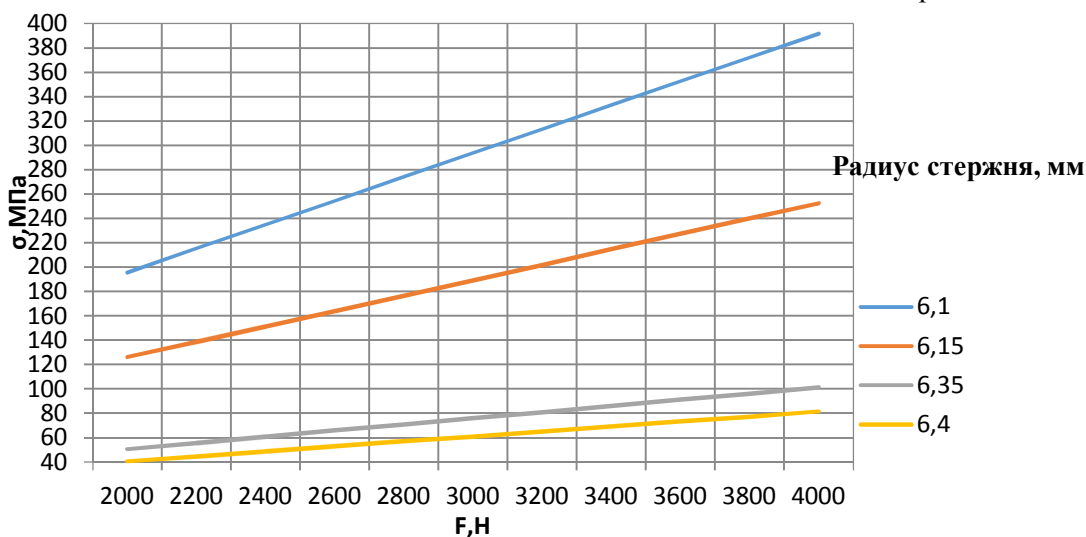


Рис. 6. Нагрузки в зоне контакта стержня и кольца

Результаты, полученные в ходе расчетов, можно использовать для подбора материалов, а так же геометрии изделий других конструкций различных устройств и узлов машин и агрегатов.

**Источник финансирования.** Программа развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Пат. 142819 Российская Федерация МПК F16B 13/00 (2006.01). Устройство для забивания дюбелей / Чепчуров М. С., Жуков Е. М.; заявитель и патентообладатель Чепчуров М. С., Жуков Е. М. № 2014110755; заявл. 20.03.2014; опубл. 10.07.14, Бюл. № 19. 3 с.
2. Чепчуров М.С., Афанасова Ю.А. Моделирование ударного взаимодействия режущей части инструмента с деталью // Технология машиностроения. 2010. № 1. С. 16-18.
3. Белкин И.М. Допуски и посадки: учеб пособие/ М.: Машиностроение, 1992. 528 с.
4. FreeCAD. URL: <https://www.freecadweb.org/> (дата обращения: 27.09.2017)
5. Falck B., Falck D., Collette B., 2012, Freecad, Packt Publishing Ltd.
6. Чепчуров М.С., Дуганов В.Я. Оценка состояния оборудования технологической системы на основе расчетов напряженно-деформированного состояния // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2016. № 11. С. 20–23.
7. CalculiX USER'S MANUAL - CalculiX GraphiX, Version 2.14 - Klaus Wittig May 29, 2018
8. Чепчуров М.С. Обработка деталей с неравномерным по структуре материалом припуска // Технология машиностроения. 2008. №10. С.12–14.
9. Атапин В.Г., Родионов А.И., Рыков А.А., Титоренко В.П., Юрьев Г.С., Иванов Ю.А. Стенды устройства для испытаний материалов и специзделий на ударную прочность и ударную устойчивость // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2009. №3(36). С.87–98.
10. Dynamic Analysis of Constrained System of Rigid and Flexible Bodies With Intermittent Motion Y. A. Khulief and A. A. Shabana [+] Author and Article Information J. Mech., Trans., and Automation 108(1), 38-45 (Mar 01, 1986) (8 pages) doi:10.1115/1.3260781 History: Received July 10, 1984; Online November 19, 2009
11. Reliability of CSP Interconnections Under Mechanical Shock Loading Conditions .Article (PDF Available) in IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 29(4):787 – 795. January 2007 with 69 Reads DOI: 10.1109/TCAPT.2006.885948
12. Kruszka L., Vorobiov Y.S., Ovcharova N.Y. Fem analysis of cylindrical structural elements under local shock loading // Applied Mechanics and Materials. 2014. Т. 566. С. 499–504.
13. Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А. и др. Марочник сталей и сплавов/ Под общ. ред. В.Г.Сорокина. М: Машиностроение, 1989. 640с.
14. ГОСТ 1050-2013 Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2013. 36 с.

*Информация об авторах*

**Тетерина Ирина Александровна**, аспирант кафедры технологии машиностроения. E-mail: [teterina.ia@bstu.ru](mailto:teterina.ia@bstu.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Авдеева Анна Александровна**, бакалавр кафедры технологии машиностроения. E-mail: [anett.avdeeva@yandex.ru](mailto:anett.avdeeva@yandex.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

*Поступила в декабре 2018 г.*

© Тетерина И.А., Авдеева А.А., 2019

<sup>1,\*</sup>**Teterina I.A., <sup>1</sup>Avdeeva A.A.**

<sup>1</sup>*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov  
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.*

*\*E-mail: [teterina.ia@bstu.ru](mailto:teterina.ia@bstu.ru)*

## THE DETERMINATION OF THE STRUCTURAL PARAMETERS OF MECHANICAL ENGINEERING PRODUCTS BY THE FINITE ELEMENT METHOD

**Abstract.** *The article deals with the finite element method for design analysis. The results of strength test of construction are obtained by the authors. The structural parameters of details, when they are connected by heating, have also been determined. A specialized calculating machine Calculix with a license GPL is used as a finite element method package. Its consistency of application is described in the work. The net NETGEN 3.0 generator is used for automation of calculations providing fast and correct splitting initial objects into a grid*

of final elements. As an example, the original construction of the hammer is considered; it contains a rod and a ring, the displacement of which is not allowed. For this reason, it requires landing on the rod with tension. The authors propose the solution of this task by the use of FEM analysis. Also, using the FEM analysis package, the problem of determining the strength of rod and the selection of core material is solved. At the same time, a modal analysis of the structure is performed and the material is selected for tensile strength among famous steel grades. The results of stress analysis and other deformations according to R. Mises are the initial criteria for the selection of material.

**Keywords:** non-detachable connection, modelling, accuracy, deformation, finite element method, dependence, static strength, modal analysis.

## REFERENCES

1. Chepchurov M.S., Zhukov E.M. An apparatus for driving anchors. Patent RF, no. 2014110755, 2014.
2. Chepchurov M.S., Afanaskova Yu.A. Modelling of the percussive interaction between tool cutting part and component part. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 2010, no.1, pp. 16–18.
3. Belkin I.M. Tolerances and landings. M.: Mashinostroeniye, 1992, 528 p.
4. FreeCAD. URL: <https://www.freecadweb.org/> (дата обращения: 27.09.2017)
5. Falck B., Falck D. and Collette, B. (2012), *Freecad*, Packt Publishing Ltd.
6. Chepchurov M.S., Duganov V.Ya. State assessment of technological system equipment, based on calculations of deflected mode. *Remont, vostanovlenie, modernizatsia*, 2016, no.11, pp.20–23.
7. CalculiX USER'S MANUAL - CalculiX GraphiX, Version 2.14 - Klaus Wittig May 29, 2018
8. Chepchurov M. S. Processing of the parts with structurally non-uniform excess material. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 2008, no. 10, pp.12–14.
9. Atapin Vladimir G., Rodionov Andrey I., Rykov Anatoliy A., Titorenko Victor P., Yur'Ev Gennady S., Ivanov George A. The testing - machines and devices for the tests of materials and special details on impact strength and impact stability. *Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2009, no.3, pp.87–98.
10. Dynamic Analysis of Constrained System of Rigid and Flexible Bodies With Intermittent Motion Y. A. Khulief and A.A. Shabana [+] Author and Article Information *J. Mech., Trans., and Automation* 108(1), 38–45 (Mar 01, 1986) (8 pages) doi:10.1115/1.3260781 History: Received July 10, 1984; Online November 19, 2009
11. Reliability of CSP Interconnections Under Mechanical Shock Loading Conditions .Article (PDF Available) in *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 29(4):787 - 795 January 2007 with 69 Reads DOI: 10.1109/TCAPT.2006.885948
12. Kruszka L., Vorobiov Y.S., Ovcharova N.Y. Fem analysis of cylindrical structural elements under local shock loading. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 566, pp. 499–504.
13. Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Vyatkin S.A. Marker steel and alloys. M.: Mashinostroeniye, 1989, 640 p.
14. GOST 1050-2013 Metal products from non-alloyed structural quality and special steels. Technical conditions. Moscow: Standartinform, 2013, 36 p.

### Information about the author

**Teterina, Irina A.**, Postgraduate student. E-mail: [teterina.ia@bstu.ru](mailto:teterina.ia@bstu.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Avdeeva, Anna A.**, Bachelor student. E-mail: [anett.avdeeva@yandex.ru](mailto:anett.avdeeva@yandex.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

*Received in Desember 2018*

### Для цитирования:

Тетерина И.А., Авдеева А.А. Использование пакета кэ-анализа в определении конструктивных параметров изделий машиностроения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №2. С.149–155. DOI: 10.12737/article\_5c73fc382e33e6.05913951

### For citation:

Teterina I.A., Avdeeva A.A. The determination of the structural parameters of mechanical engineering products by the finite element method. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2019, no. 2, pp. 149–155. DOI: 10.12737/article\_5c73fc382e33e6.05913951