

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ЗАГОТОВКИ ТРУБЧАТОЙ ФОРМЫ С ПОРОШКОВЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Грибков Э. П., Ризак П. И., Малыгин С. О.

Рассмотрена конечно-элементная модель процесса волочения порошковой проволоки. В модели учтено напряженно-деформированное состояние как порошкового сердечника, так и металлической оболочки. На основе модели было рассмотрено автоматизированное проектирование технологических режимов. В качестве критериев были использованы условия по обеспечению требуемой плотности сердечника, требуемого диаметра проволоки и сохранения целостности оболочки. Получены результаты применительно к волочению проволоки из медного порошка в медной оболочке. Эквивалентная деформация оболочки при этом не превысила 40 %, относительная плотность сердечника составила 0,75, а сила волочения достигла 3,6 кН. Предложенный алгоритм по автоматизированному проектированию технологических режимов волочения позволяет определять минимальное количество проходов при одновременном обеспечении целостности оболочки и требуемой плотности порошкового сердечника.

Розглянуто скінчено-елементна модель процесу волочіння порошкового дроту. У моделі враховано напружено-деформований стан як порошкового осердя, так і металевої оболонки. На основі моделі було розглянуто автоматизоване проектування технологічних режимів. В якості критеріїв були використані умови щодо забезпечення необхідної щільності осердя, необхідного діаметра дроту і збереження цілісності оболонки. Отримано результати стосовно до волочіння дроту з мідного порошку в мідній оболонці. Еквівалентна деформація оболонки при цьому не перевищила 40 %, відносна щільність осердя склала 0,75, а сила волочіння досягла 3,6 кН. Запропонований алгоритм з автоматизованого проектування технологічних режимів волочіння дозволяє визначати мінімальну кількість проходів при одночасному забезпеченні цілісності оболонки і необхідної щільності порошкового осердя.

A finite element model of the wire drawing process is considered. The stress-strain state of both the powder core and the metal shell are taken into account in the model. On the basis of the model, the automated design of processing methods was considered. As criteria, conditions were used to ensure the required core density, the required wire diameter, and maintain the integrity of the shell. The results with reference to drawing wire from a copper powder in a copper shell were obtained. The equivalent deformation of the shell did not exceed 40%, the relative density of the core was 0.75, and the drawing force reached 3.6 kN. The proposed algorithm for the computer-aided design of processing methods of drawing allows to determine the minimum number of passes while ensuring the integrity of the shell and the required density of the powder core simultaneously.

Грибков Э. П.

д-р техн. наук, доц. каф. АММ ДГМА  
[amm@dgma.donetsk.ua](mailto:amm@dgma.donetsk.ua)

Ризак П. И.

аспирант ДГМА

Малыгин С. О.

студент каф. ПТМ ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.791.95

**Грибков Э. П., Ризак П. И., Малыгин С. О.**

## **КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ЗАГОТОВКИ ТРУБЧАТОЙ ФОРМЫ С ПОРОШКОВЫМ СЕРДЕЧНИКОМ**

Качественные показатели сварочного шва определяются многими факторами. Многие из этих факторов связаны с качественными характеристиками электрода – порошковой проволоки, которые предопределяются на стадии её изготовления. Такого типа электроды получают путём волочения сердечника из порошкового материала в металлической оболочке. Перед волочением проволоку формируют путём гибки металлической ленты с одновременным заполнением профиля порошком. Обжатия при волочении порошковой проволоки задаются из условия получения требуемых характеристик электрода: наружного диаметра; толщины металлической оболочки; плотности порошкового сердечника.

Волочение обеспечивает высокую производительность процесса и точность изготовления порошковых электродов, позволяет изготавливать конструкции оболочки различной сложности, в широких пределах варьировать количество переделов [1, 2]. Указанные преимущества приводят к снижению себестоимости производства таких порошковых электродов [3]. При волочении не всегда можно добиться требуемого уплотнения сердечника в оболочке. Особенно это характерно при содержании в сердечнике твердых частиц и частиц больших размеров, в сравнении с частицами других компонентов.

На характеристики порошковой проволоки при волочении существенное влияние оказывают напряжения и деформации в очаге деформации. Изучение этого влияния позволит улучшить качественные показатели готовой проволоки, разработать оптимальные технологические режимы волочения, рассчитать оптимальную форму инструмента (волоки) и в итоге снизить затраты на производство.

В работах [4–6] исследован процесс волочения порошковой проволоки, определено влияние условий деформаций на плотность порошкового сердечника, но задача рассматривалась без учета монометаллической оболочки.

Цель работы – определить влияние технологических параметров на деформацию металлической оболочки и порошкового сердечника при волочении порошковой проволоки, сформулировать критерии оптимизации для автоматизированного проектирования технологических режимов волочения по определению минимального количества проходов при обеспечении требований к готовой порошковой проволоки.

Для определения напряженно-деформированного состояния при совместной деформации порошкового сердечника и металлической оболочки при волочении порошковой проволоки была разработана конечно-элементная модель данного процесса.

При моделировании использовалась расчетная схема, которая представляла собой деформируемую заготовку и волоку (рис. 1). В качестве заготовки использовали металлическую оболочку со свойствами сплошной среды, заполненную порошковым сердечником со свойствами пористого тела. Для моделирования волоки были использованы недеформируемые элементы. Для моделирования и порошкового сердечника и металлической оболочки были использованы четырёхузловые линейные, твердотельные редуцированные элементы с контролем разрушения SAH4R [7, 8].

На рис. 2 представлены полученные в результате расчета поля распределений эквивалентных напряжений (см. рис. 2, а), деформаций в продольном (см. рис. 2, б) и радиальном (см. рис. 2, в) направлениях, а также поле распределения относительной плотности порошкового сердечника (см. рис. 2, г).

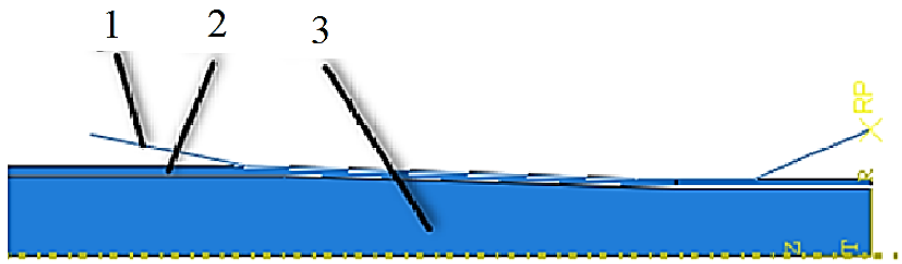


Рис. 1. Расчетная схема конечно-элементной модели процесса волочения порошковой проволоки в металлической оболочке:

1 – волока; 2 – металлическая оболочка; 3 – порошковый сердечник

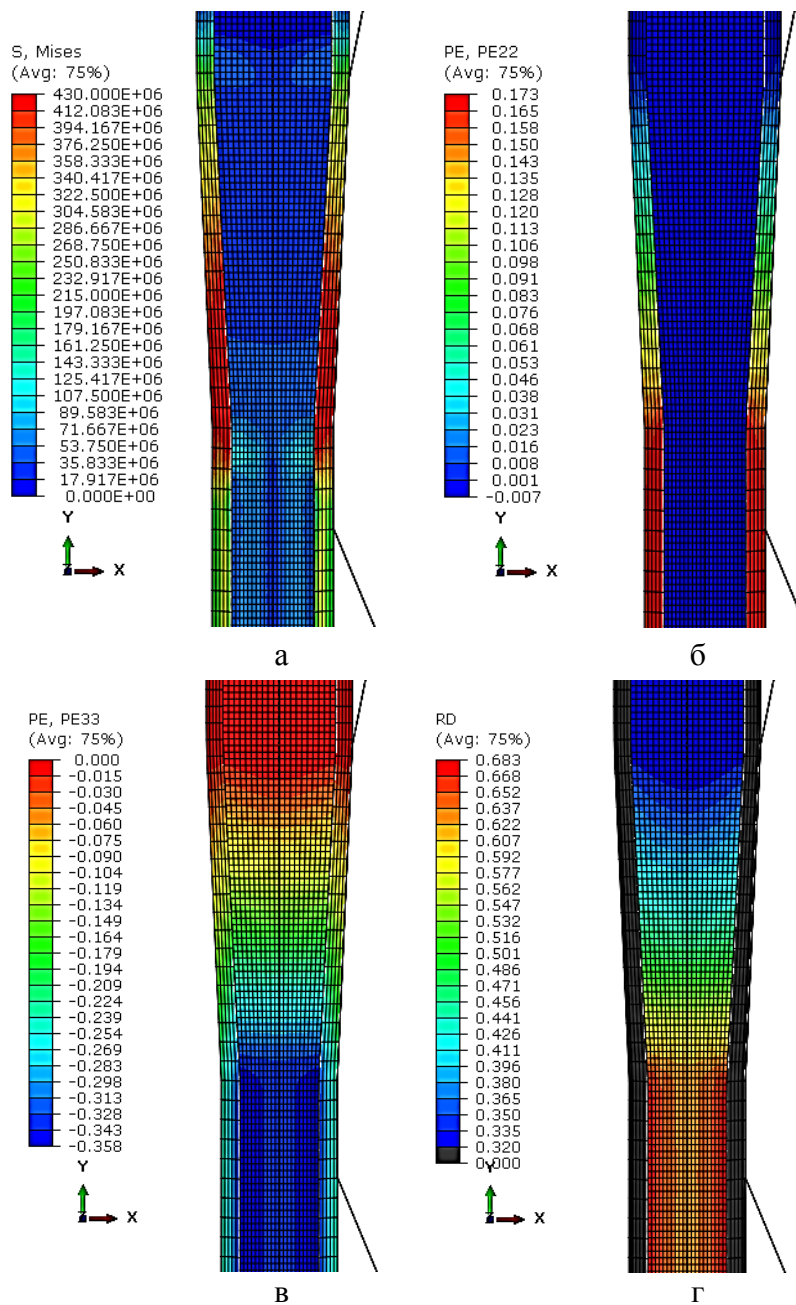


Рис. 2. Поля распределений эквивалентных напряжений (а), деформаций в продольном (б) и радиальном (в) направлениях, относительной плотности порошкового сердечника (г)

Анализ полученных на основе метода конечных элементов результатов расчета показал, что для порошкового сердечника неравномерность распределения деформаций не превысила 4,0 %, а относительной плотности – 6,8 %, в то время как для металлической оболочки напряжения и деформация по сечению распределяются практически равномерно.

При производстве порошковой проволоки влияние ряда факторов на протекание практически невозможно учесть при расчётах, а именно несовпадение осей заготовки и проволоки на входе или выходе из очага деформации, неоднородность материала сердечника и оболочки по длине заготовки, поверхностные и внутренние дефекты заготовки, влияние окружающей среды на физико-механические свойства порошка, износ волочильного оборудования и т. п. Все эти факторы заметно изменяют силы и натяжения при волочении и отклоняют их от расчетных. Поэтому для нормального течения процесса необходимо, чтобы металл после выхода из проволоки имел некоторый запас прочности, т. е. чтобы напряжение волочения не превышало некоторой доли сопротивления растяжению. Для моделирования возможного обрыва оболочки использовалась модель разрушения Бао-Вербички.

Использование модели разрушения для монометаллической оболочки при автоматизированном проектировании процесса волочения позволяет, с одной стороны, обеспечить требуемую степень надежности протекания технологического процесса и, с другой стороны, добиться максимально возможной загрузки оборудования, т. е. сократить время технологического передела и тем самым снизить себестоимость выпускаемой металлопродукции.

Также при автоматизированном проектировании технологических режимов был использован критерий по обеспечению необходимого значения относительной плотности порошкового сердечника, что было выражено следующим равенством:

$$\gamma_{x2i}|_{i=K_R} = [\gamma], \quad (1)$$

где  $[\gamma]$  – требуемое значение относительной плотности сердечника.

В основу автоматизированного проектирования технологических режимов был положен численный метод целенаправленного перебора вариантов. Аналитическое описание используемого метода может быть выражено следующей зависимостью при заранее заданном минимальном значении исходного диаметра заготовки:

$$d_{0(k+1)} = d_{0k} + A, \quad (2)$$

где  $k$  – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры расчета;

$A$  – задаваемый шаг изменения диаметра заготовки;

$[x]$ ,  $x_k$  – предварительно заданное и расчетное значение параметра, обусловленные системой принятых ограничений, выраженных условиями обеспечения заданной плотности порошкового сердечника и сохранения сплошности оболочки.

На рис. 3...5 представлены результаты автоматизированного проектирования волочения медной порошковой проволоки в медной оболочке из условия обеспечения требуемого конечного диаметра проволоки и плотности порошкового сердечника. Из рис. 3 видно, что сила волочения при заданных режимах не превышает 3,6 кН и эта величина может быть использована при проектировании механического оборудования волочильного стана. На рис. 4 представлены распределения эквивалентной деформации металлической оболочки по проходам, в последнем проходе данная величина не превысила 40 %, что обеспечило отсутствие обрывов оболочки при волочении. На рис. 5 представлено распределение относительной плотности порошкового сердечника по проходам и в последнем проходе она составила 0,75, что обеспечивает максимально возможную фракцию порошка при исключении его просыпания при транспортировке и подаче в рабочую зону сварки.

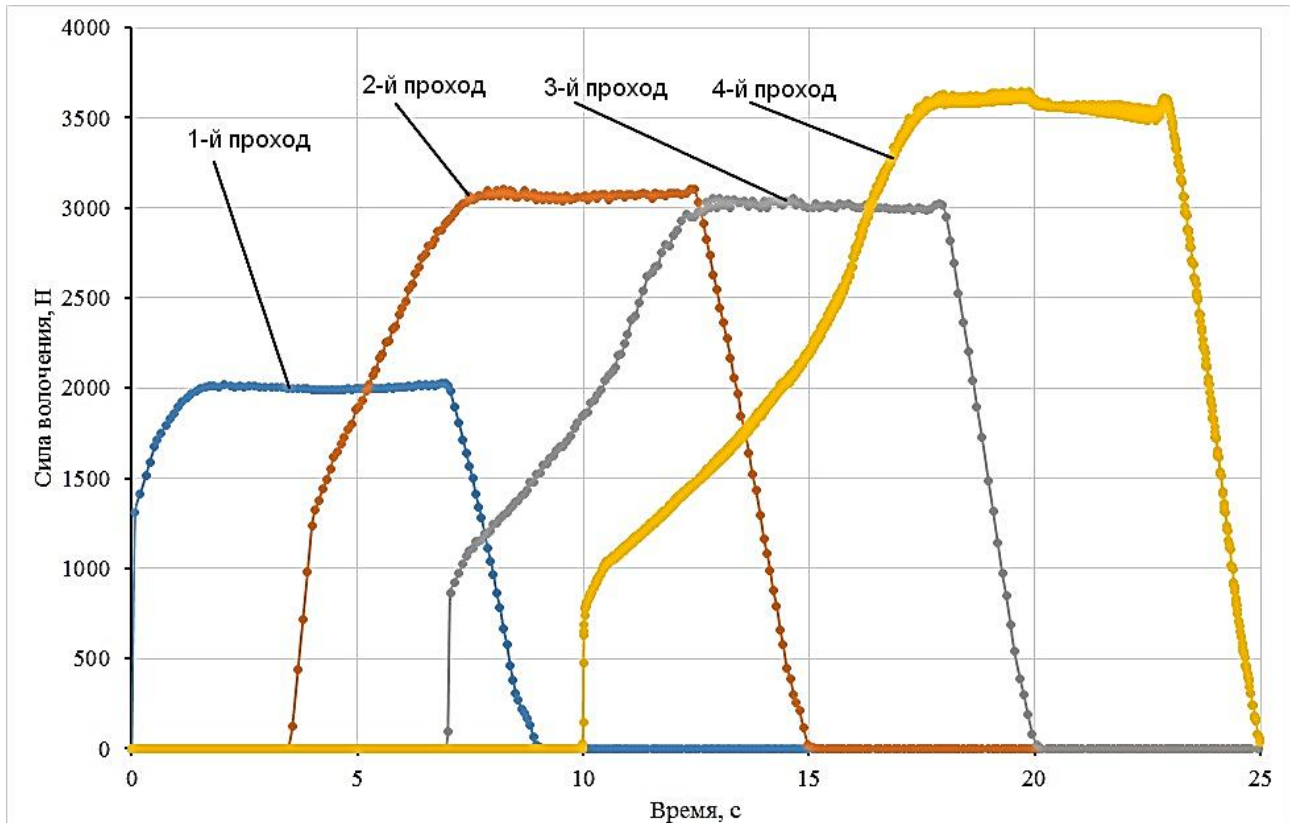


Рис. 3. Распределение силы волочения по проходам при производстве порошковой проволоки

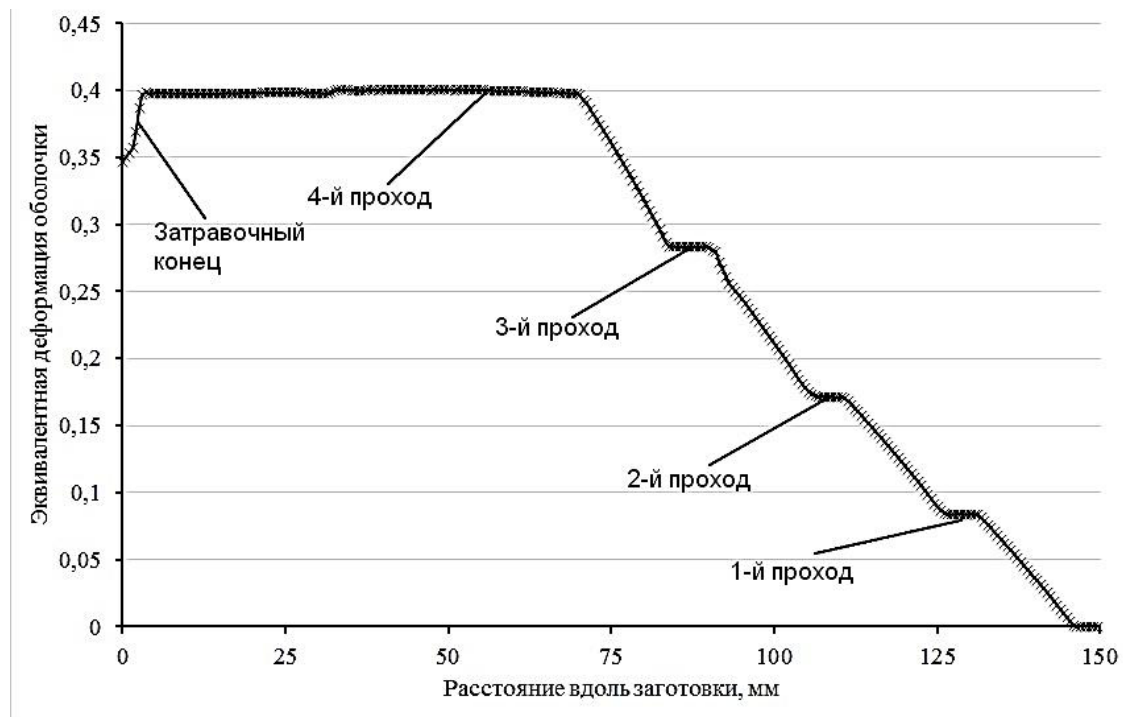


Рис. 4. Распределение эквивалентной деформации оболочки по проходам при производстве порошковой проволоки

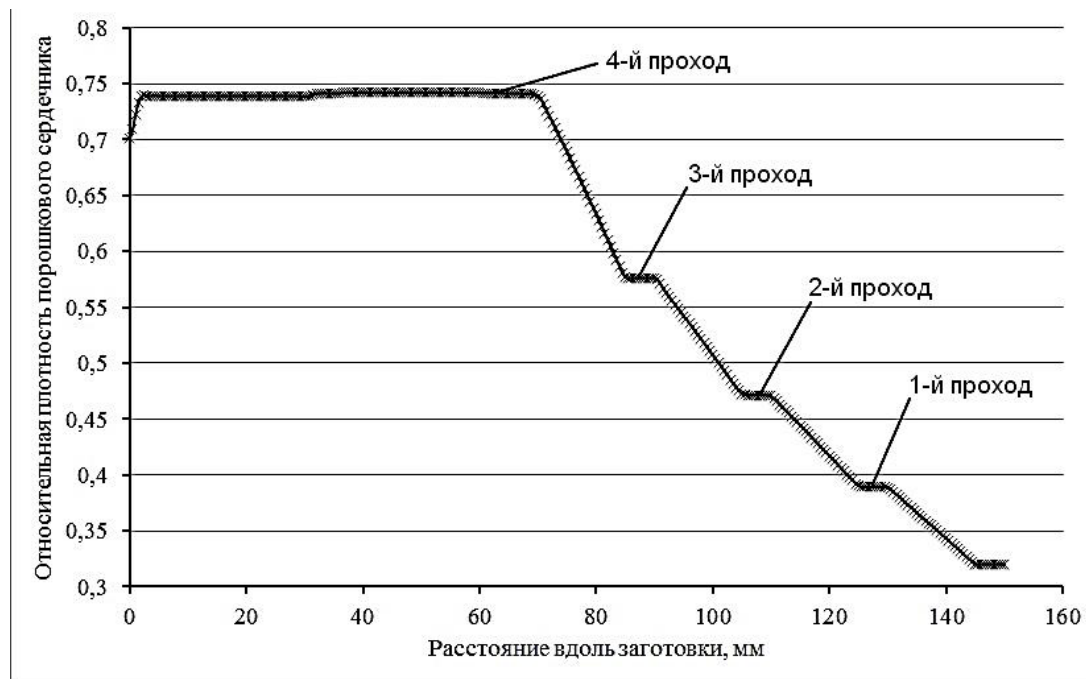


Рис. 5. Распределение относительной плотности порошкового сердечника по проходам при производстве порошковой проволоки

## ВЫВОДЫ

На основе реализации конечно-элементной модели процесса волочения порошковой проволоки в металлической оболочке сформулированы критерии оптимизации и разработан алгоритм по автоматизированному проектированию технологических режимов волочения, позволяющий определять минимальное количество проходов при одновременном обеспечении целостности оболочки и требуемой плотности порошкового сердечника.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Производство порошковой проволоки с фальцевым швом / В. Д. Есипов [и др.] // *Сталь*. – 2000. – № 12. – С. 48–49.
2. Формовочный стан для производства порошковой проволоки с замковым соединением / В. Д. Есипов [и др.]. // *Черные металлы*. – 1998. – № 8. – С. 23–24.
3. Походня И. К. Изготовление порошковой проволоки из лент разных размеров / И. К. Походня, В. Ф. Альтер, П. И. Рак // *Сварочное производство*. – 1980. – № 10. – С. 14–15.
4. До питання оптимізації режимів волочіння порошкового дроту / М. Б. Штерн, Л. Н. Ткаченко, О. Г. Кіркова, А. В. Кузьмов, О. П. Майданюк // *Математичні моделі і обчислювальний експеримент в матеріалознавстві*. – Київ : ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України, 2009. – № 11. – С. 111–117.
5. Дослідження процесу ущільнення порошкового осердя під час волочіння порошкового дроту на основі моделі пластичного деформування пористих матеріалів / Л. Н. Ткаченко, О. Г. Кіркова, А. В. Кузьмов, М. Б. Штерн // *Математичні моделі і обчислювальний експеримент в матеріалознавстві*. – Київ : ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України, 2012. – № 14. – С. 116–122.
6. Simulation of Powder-Cored Wire Drawing / E. G. Kirkova, L. N. Tkachenko, A. V. Kuz'mov, M. B. Shtern, A. P. Maidanyuk // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – November 2013. – Volume 52. – Issue 7. – pp. 393–400. – doi: 10.1007/s11106-013-9539-1.
7. Боровік П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів : навчальний посібник / П. В. Боровік. – Алчевськ : ДонДТУ, 2012. – 170 с.
8. Манилык Т. Н. Практическое применение программного комплекса ABAQUS в инженерных задачах. Версия 6.5. / Т. Н. Манилык, К. В. Ильин // *МФТИ, ТЕСИС*, 2006. – 67 с.

Статья поступила в редакцию 21.10.2017 г.