

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

УДК 539.375:621.77

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-458-466>

Поступила в редакцию 16.07.2019

Received 16.07.2019

А. А. Абрамов

Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ

Аннотация. В статье рассматривается вопрос подготовки исходных данных для компьютерного моделирования процесса пластического формообразования изделий при поперечно-клиновой прокатке (ПКП) на базе системы конечно-элементного анализа ANSYS/LS-DYNA. Для автоматизации процесса построения моделей ПКП и проведения расчетов было разработано специализированное программное обеспечение (ПО ПСПД), которое обеспечивает формирование конечно-элементной (КЭ) и расчетной модели процесса прокатки с учетом специфики технологического процесса ПКП и с учетом различных аспектов применения метода конечных-элементов (МКЭ) в области обработки металлов давлением (ОМД). Данное ПО взаимодействует с базовой системой через APDL-скрипты – сценарии, которые описывают отдельные последовательности действий по подготовке КЭ модели и выбору параметров решателя для запуска задачи. ПСПД обеспечивает графический интерфейс, благодаря которому пользователь вводит данные необходимые для генерации APDL-скриптов, построение же модели выполняется автоматически в ANSYS в скрытом режиме при их запуске. Кроме того, ПСПД обеспечивает подготовку расчетной модели для самого решателя и обеспечивает управление процессом расчета. Помимо описания функциональных возможностей программы и ее графического интерфейса в статье приводится методика подготовки КЭ и расчетных моделей на базе ПСПД, а также рассматриваются основные этапы создания компьютерной модели ПКП в ANSYS/LS-DYNA, которые автоматизированы в ПСПД. Разработанная программа позволяет существенно снизить требования к знаниям в области компьютерного моделирования у инженеров, занимающихся разработкой инструмента и техпроцессов для прокатки, дает возможность оперативно создавать и изменять КЭ модели, проводить исследования поперечно-клиновой прокатки для различных исходных данных техпроцесса и параметров решателя.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, пластическое деформирование, поперечно-клиновая прокатка, напряженно-деформированное состояние, пластичность, КЭ модели

Для цитирования: Абрамов, А. А. Автоматизация подготовки данных для компьютерного моделирования процесса поперечно-клиновой прокатки / А. А. Абрамов // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2019. – Т. 64, №4. – С. 458–466. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-458-466>

A. A. Abramov

Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

DATA PREPARATION AUTOMATION FOR COMPUTER SIMULATION OF CROSS-WEDGE ROLLING

Abstract. Data preparation for computer simulation of cross-wedge rolling (CWR) process based on ANSYS/LS-DYNA finite element code is considered in the article. In order to automate the process of developing CWR models and performing their finite element analysis, specialized software (PSPD) was developed. This software provides creation of a finite element (FE) model of the rolling process considering the specifics of CWR technological processes and different aspects of the application of the finite element methods (FEM) in the metal-forming processing. PSPD interacts with the base system through APDL scripts, that describe individual sequences of actions for preparing the FE model and choosing solver parameters to run the task. PSPD provides a graphical user interface (GUI) which allows users to enter necessary data for generating APDL

scripts, the model builds automatically in ANSYS in batch mode when scripts are run. Also, PSPD provides preparation of the FE model for solver and provides managing the calculation process. In addition to describing the functionality and features of the program and its GUI, the article provides techniques and methods of FE model preparation for computer analysis using the developed software as well as the main steps of creating FE model in ANSYS/LS-DYNA, which are automated in PSPD. PSPD can significantly reduce the demand for knowledge in the field of computer simulation to the engineers engaged in the development of tools and technical processes for rolling, it allows quickly creating and modifying FE models, performing CWR research for a variety of input data of process technology and solver parameters.

Keywords: computer simulation, plastic straining, cross-wedge rolling, stress-strain state, plasticity, FE models

For citation: Abramov A. A. Data preparation automation for computer simulation of cross-wedge rolling. *Vestsi Natsyyanal'naï akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 4, pp. 458–466 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-458-466>

Введение. Наибольшее распространение при компьютерном моделировании процессов обработки металлов давлением, к которым относится поперечно-клиновое прокатание (ПКП), получил метод конечных элементов (МКЭ). Данный метод позволяет провести всестороннее исследование процесса пластического формоизменения заготовки, определить напряженно-деформированное состояние, рассмотреть и сопоставить большое количество различных вариантов технологического процесса прокатки, не прибегая непосредственно к натурным экспериментам.

В качестве программной среды для проведения компьютерного моделирования процессов прокатки с использованием МКЭ выбрано решение на базе ANSYS/LS-DYNA. ANSYS/LS-DYNA – это специализированный модуль универсальной среды инженерного анализа ANSYS [1] с полностью интегрированным решателем LS-DYNA [2], который предназначен для расчета высоконелинейных динамических процессов.

Вместе ANSYS и LS-DYNA образуют программный комплекс, имеющий специальные средства (пре- и пост процессоры), которые позволяют как создавать КЭ модели процессов пластического деформирования металла, так и читать, редактировать и обрабатывать результаты моделирования. Однако из-за своей универсальности в ANSYS/LS-DYNA нет специальных средств для моделирования конкретно процессов ПКП, поэтому для построения адекватной компьютерной модели прокатки требуются знания не только в предметной области, но и метода конечных элементов, интерфейса программной среды инженерного анализа, а также правил и методик создания КЭ моделей. Это является одной из причин, почему конструктора и технологи, которые занимаются проектированием инструмента и разработкой технологических процессов ПКП, не используют данный инструмент. Хотя выгода от компьютерного моделирования для оценки выбранных решений очевидна.

Кроме того, при моделировании в процессе изучения прокатки конкретной детали зачастую требуется проведение серии экспериментов, в которых может меняться несколько параметров (геометрия инструмента, температура, скорость прокатки и т. д.) [3–5].

Открывать и перестраивать модель внутренними средствами ANSYS/LS-DYNA не всегда является целесообразным, так как может потребоваться много времени, чтобы подготовить модель с нужными параметрами, а в случае изменения геометрии инструмента – также и полное перестроение КЭ модели.

В связи с этим были разработаны специальные программные средства автоматизации подготовки исходных данных для компьютерного моделирования процесса поперечно-клинового прокатки на базе ANSYS/LS-DYNA (далее ПСПД).

В данной статье приведено описание методики подготовки моделей для проведения компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния процессов ПКП с помощью ПСПД. Рассмотрены основные этапы подготовки компьютерных моделей, описаны функциональные возможности и приемы работы с ПСПД, а также описан графический интерфейс программы.

Основные этапы решения задачи моделирования процесса ПКП. Решение задачи моделирования прокатки с использованием ПСПД можно условно разбить на несколько этапов:

1) подготовка расчетной геометрической модели объекта моделирования, или этап геометрического моделирования. На данном этапе средствами САД систем выполняется построение геометрической модели инструмента и заготовки. Хотя этот этап и не является обязательным для современных систем моделирования, которые имеют внутренние средства для построения САД моделей, однако он рекомендуется при использовании ПСПД, не имеющего такого функционала, а лишь импортирующего модели в унифицированных форматах;

2) подготовка расчетной КЭ модели, или этап препроцессорной подготовки. На данном этапе с помощью ПСПД задаются необходимые для решения задачи исходные данные, которые используются для построения сетки конечных элементов, задания граничных условий, определения модели поведения деформируемого материала, задания опций решателя и т. д.;

3) непосредственно решение задачи, или этап процессинга. По сути, на данном этапе осуществляется численное решение задачи. Для этих целей используется решатель LS-DYNA. ПСПД на данном этапе производит запуск задачи, остановку выполнения расчетов и контроль за ходом решения;

4) получение и анализ результатов расчета, или этап постпроцессорной обработки. На данном этапе с помощью специальных средств проводится обработка результатов решения и их интерпретация путем получения полей (эпюр) распределения напряжений и деформаций. Хотя ПСПД не обладает специальными средствами просмотра результатов выполненных расчетов, однако в нем присутствует функционал для получения табличных данных и вывода их в виде диаграмм и графиков, а также для сравнения данных по нескольким экспериментам.

Принципы работы ПСПД на этапе препроцессорной подготовки. Методика проведения компьютерного моделирования процессов ПКП, используя решатель LS-DYNA и сеточный генератор ANSYS, была представлена автором в предыдущих статьях [6, 7]. Поэтому в данной статье не рассматривались правила подготовки и особенности разработки КЭ и расчетных моделей для LS-DYNA. Ниже описаны общие подходы и принципы, которые легли в основу ПСПД.

Работа ПСПД основана на использовании ANSYS APDL – параметрического процедурного языка программирования для ANSYS, который можно использовать для автоматизации общих задач препроцессорной подготовки и построения любой КЭ модели с использованием специальных выражений и параметров без непосредственной работы с графическим интерфейсом [8].

Использование APDL в ПСПД сводится к автоматизации построения КЭ модели на базе импортированной в нейтральном формате геометрической модели и генерации сетки, используя пакет ANSYS в скрытом режиме. При создании сетки для соответствующих фрагментов геометрической модели элементам назначаются некоторые атрибуты: тип элемента, его размер и свойства применяемого материала. Этими параметрами можно управлять для различных конфигураций модели.

В основе построения КЭ модели с помощью ПСПД лежит подход, основанный на формализации процесса построения сетки КЭ в пакете ANSYS, подготовки и запуска скрипта в режиме пакетной обработки.

Скрипт содержит набор команд, которые описывают последовательность действий по созданию КЭ модели, при этом выполнение происходит автоматически без участия пользователя в этом процессе и без использования графического интерфейса пользователя ANSYS GUI. Такой подход позволяет более гибко подходить к процессу подготовки любой моделей ПКП, а сам процесс создания выполняется намного быстрее.

Алгоритм работы ПСПД и соответственно методика создания расчетных моделей в нем будет следующей:

1) выполняется настройка пакета ANSYS для работы со средой LS-DYNA, задаются опции для работы в скрытом режиме;

2) задаются глобальные параметры (переменные), которые будут управлять моделью. Такими параметрами являются: размер сетки, свойства материала, температура, скорость перемещения инструмента и т. д.;

3) задаются атрибуты для создаваемой конечно-элементной модели (тип конечных элементов, модель материала и т. д.);

4) выполняется импорт геометрической модели с использованием специального транслятора данных;

5) выполняется назначение атрибутов для геометрической модели, задаются размеры сетки для различных элементов геометрической модели (для линий, поверхностей или всего объема), выполняется группировка элементов геометрической модели по основным типам;

6) выполняется автоматическая генерация сеточной модели;

7) выполняется сохранение модели во внутренний формат LS-DYNA.

Если геометрическая модель представляет собой несколько твердых тел или является сборкой, то процедуры 3–6 выполняются для каждой отдельной части.

После выполнения указанного алгоритма будет сгенерирована КЭ модель, которая используется как основа для построения расчетной модели. Отличие их заключается в том, что в КЭ модели еще не заданы граничные условия (нагрузки и ограничения), а также специфические для решателя LS-DYNA опции контроля за ходом расчета (временные параметры, параметры подавления искажения элементов и т. д.).

Таким образом, на этапе препроцессорной подготовки данных для моделирования прокатки ПСПД решаются следующие задачи:

определяется размерность модели (положение конечных элементов). Если рассматривается плоская задача, то используются 2D конечные элементы, для трехмерной постановки соответственно 3D элементы;

определяются степени свободы элементов модели. Задание физических степеней свободы служит для описания геометрии элемента (положения его узлов) и задания числа неизвестных функций, которые в процессе решения вычисляются с целью получения перемещений для каждого узла. Степени свободы во многом определяют точность и длительность решения задачи моделирования. Программа позволяет создавать модели для предварительных расчетов с небольшим числом степеней и соответственно для получения точных численных значений увеличивать число степеней свободы, то есть менять густоту сетки;

задается геометрия конечных элементов. Геометрия элемента определяется расположением узловых точек в конечном элементе. Большинство элементов, используемых в расчетах, имеют простую геометрическую форму. В случае 2D постановки задачи элементы будут иметь трех- или четырехстороннюю форму, а в 3D задачах геометрические фигуры типа тетраэдр или гексаэдр;

задается тип разбиения сетки. Возможны два типа разбиения сетки: свободная и регулярная сетка конечных элементов. Свободная сетка не предъявляет никаких ограничений к форме и взаимному расположению элементов. По сравнению со свободным разбиением контролируемое разбиение (создание регулярной сетки) ограничивает форму элементов. Если необходимо получить данный тип сетки, то в ПСПД нужно импортировать геометрию как серию регулярных объемов или поверхностей. Хотя создание регулярной сетки для заготовки более сложное, однако она показывает более точные результаты при моделировании ПКП;

задаются модели материала. При проведении компьютерного моделирования высокотемпературных процессов ОМД, к которым относится ПКП, достаточно важным является правильное задание модели материала. Прежде всего это связано с тем, что процесс прокатки вызывает большие пластические деформации и смещения с малыми упругими деформациями в заготовке. Пластические деформации могут быть очень большими (до 50 % и более), поэтому требуются специальные модели материала, которые должны учитывать это. ПСПД позволяет задавать для заготовки модели материала, учитывающие данные особенности. Задание специальной модели материала для инструмента в большинстве случаев не требуется. Поэтому в ПСПД инструмент задается как абсолютно твердое тело;

определяются исходные данные для граничных условий. Для задания в КЭ модели граничных условий может понадобиться набор узлов или сегментов, для которых будет задаваться ограничение или нагрузка. Поэтому после генерации сеточной модели могут присутствовать дополнительные процедуры, обеспечивающие генерацию соответствующих наборов по указанным идентификаторам объектов или по координатам узлов;

задаются временные параметры: шаг времени расчета, интервал времени между записями выходных файлов и т. д.;

задаются параметры контроля решающей программы или параметры решателя. Данные параметры в основном связаны с методами решения уравнений в решателе. Поэтому в зависимости от выбранного метода может потребоваться указать тип решателя, параметры сходимости решения, параметры интегрирования по времени и др.

Для решения задачи моделирования процесса ПКП в термомеханической постановке ПСПД включает следующие возможности:

задание температурных параметров (теплоемкость, теплопроводность, конвективный теплообмен, начальная температура) для инструмента, заготовки и окружающей среды;

задание модели материала, в которой определена зависимость свойств материала заготовки от температуры;

использование специальных контактных алгоритмов, учитывающих перераспределение температур в контактных областях (заготовки – инструмента, воздуха – заготовки, воздуха – инструмента);

использование специальных методов решения связанных температурных и механических задач.

Функциональные возможности и интерфейс ПСПД. Помимо описанных выше функций ПСПД обеспечивает решение следующих задач:

- создание нового исследования (проекта) или открытие сохраненного;
- открытие и просмотр моделей в формате IGES, STEP или PARASOLID;
- построение КЭ модели с использованием ANSYS в скрытом режиме;
- задание кривых нагружений;
- выбор модели материала из библиотеки материалов;
- формирование расчетной модели;
- запуск расчета задачи на локальном компьютере;
- вывод результатов для выбранных узлов во внешние файлы;
- обработка результатов расчета;
- отображение результатов расчета в постпроцессоре LS-PREPOST.

Главное окно программы показано на рис. 1.

Для начала работы с программой необходимо нажать кнопку *Создать* в меню *Файл*, в результате будет сформирован новый проект. После его создания необходимо выбрать файл, для которого будет создаваться КЭ и расчетная модель.

ПСПД может работать как с одиночными файлами деталей, так и со сборочными конструкциями независимо от того в какой CAD-системе они были созданы, программа позволяет открывать любую геометрическую трехмерную модель в нейтральном формате IGES, STEP или PARASOLID.

Рабочая область программы имеет три вкладки:

Геометрическая модель, используется для отображения модели и выполнения различных операций с ней (вращение, перемещение и т. д.);

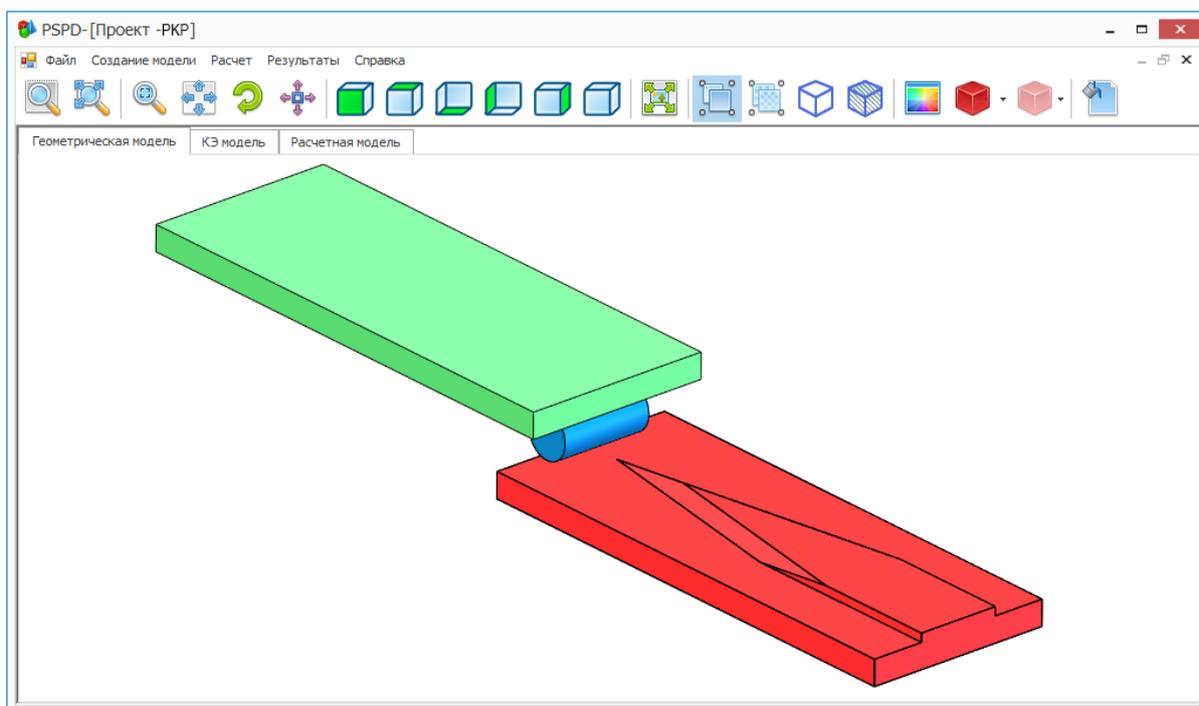


Рис. 1. Главное окно программы с открытой моделью
Fig. 1. The main window of the program with an open model

КЭ модель, используется для задания параметров, необходимых для построения КЭ модели, а также для просмотра построенной модели;

Расчетная модель, используется для задания параметров для построения расчетной модели.

Вкладка *КЭ модель* (рис. 2) предназначена для построения и просмотра модели. Для построения сеточной модели очень важно правильно подобрать размер конечного элемента, для этого нужно знать размеры модели.

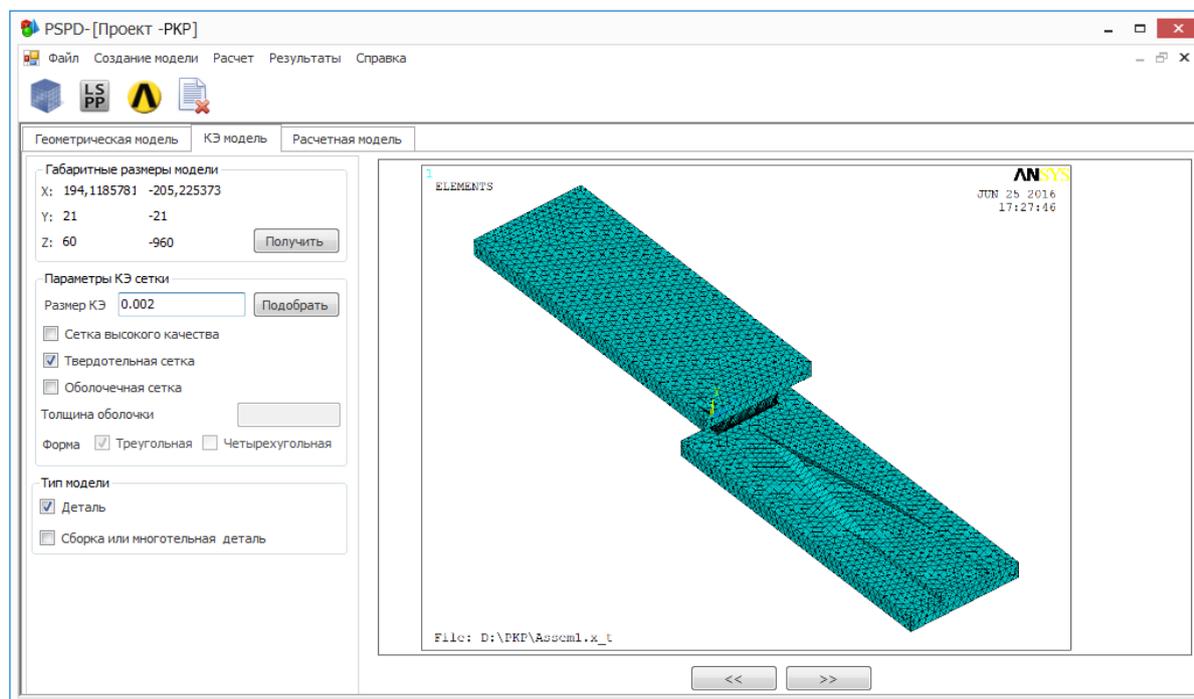


Рис. 2. Вкладка *КЭ модель*

Fig. 2. *FE model* tab

В связи с этим в программе на вкладке *КЭ модель* присутствует команда *Получить* в разделе *Габаритные размеры модели*, при ее нажатии программа рассчитывает размеры модели по трем осям. Используя эти данные, можно представить реальные размеры импортированного в программу объекта.

Чтобы автоматически рассчитать размер КЭ, используется команда *Подобрать* в разделе *Параметры КЭ сетки*. При необходимости можно изменить размер элемента вручную, введя нужное значение в соответствующее поле. В разделе *Параметры КЭ сетки* также можно задать следующие параметры:

Сетка высокого качества, позволяет построить КЭ модель, используя элементы высокого порядка, обычно данная опция используется для получения более точных результатов по сравнению со стандартной сеткой;

Твердотельная сетка, при выборе данного параметра создается твердотельная КЭ модель;

Оболочечная сетка, при выборе данного параметра создается тонкостенная оболочечная КЭ модель с использованием элементов типа Belytschko-Tsay. Данный тип модели обычно используется для моделей из листового металла или тонкостенных объектов, толщина стенки которых намного меньше, чем их габаритные размеры. При выборе параметра *Оболочечная сетка* станут доступны дополнительные параметры:

Толщина оболочки, где задается толщина оболочечной модели;

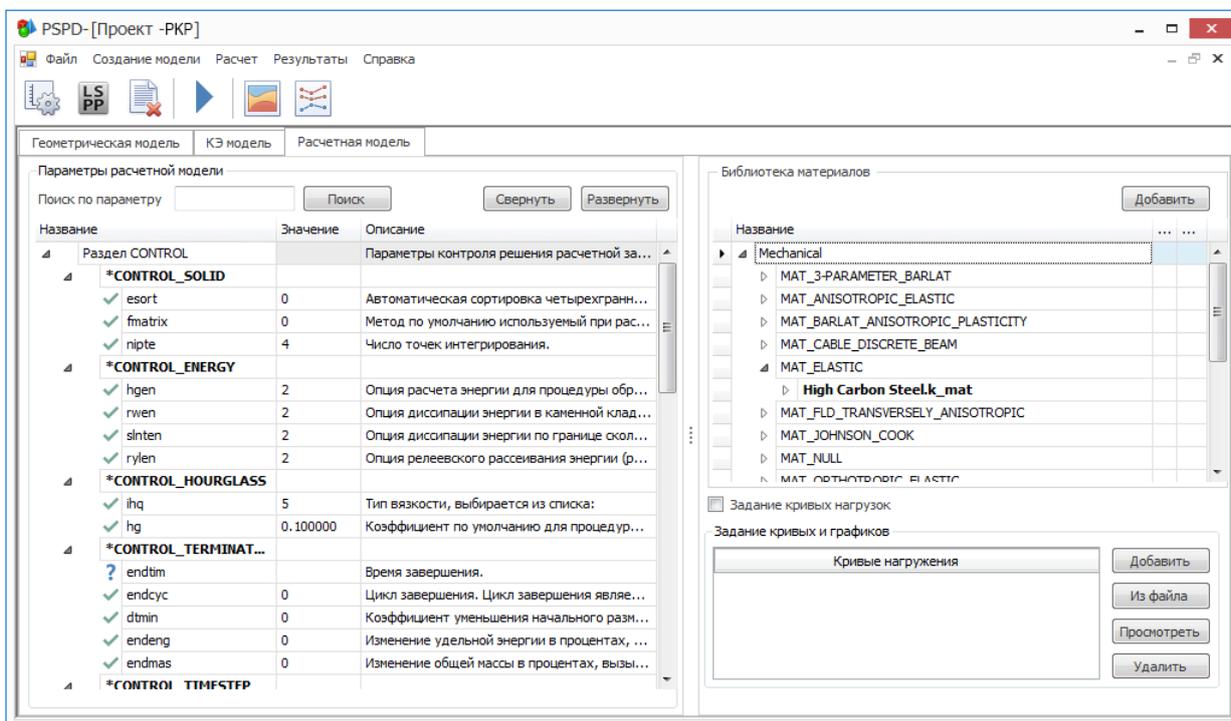
Форма элемента (треугольная или четырехугольная), позволяет указать форму КЭ для разбиения оболочечной модели.

В разделе *Тип модели* обязательно нужно указать, к какому типу относится открытый объект, к однотельной детали или сборочной конструкции из нескольких деталей или тел. Это необходимо для того, чтобы задать участвующие в расчете объекты.

Для построения КЭ модели и ее отображения в графической области на вкладке *КЭ модель* необходимо на панели инструментов или в меню *Создание модели* нажать на кнопку *Создание сетки*. После этого в скрытом режиме будет запущен ANSYS, который выполнит построение сеточной модели. Как показано на рис. 2, вид модели будет представлен в графическом окне, для перехода между различными видами модели можно использовать команды << и >>.

Для того чтобы открыть и просмотреть построенную модель в препроцессоре LS-PREPOST, нужно выбрать соответствующую команду на панели инструментов или в меню *Создание модели*. Аналогично можно открыть построенную модель в ANSYS.

После построения КЭ модели можно создать расчетную модель, для чего следует перейти на соответствующую вкладку (рис. 3). Программа автоматически генерирует необходимый перечень разделов и относящихся к ним блоков и параметров. Для большинства параметров заданы значения по умолчанию, об этом свидетельствует зеленый значок галочки около параметра. У параметров, для которых требуется ввести значение, стоит синий знак вопроса.

Рис. 3. Вкладка *Расчетная модель*Fig. 3. *Calculation model* tab

Используя команды *Свернуть/Развернуть* можно свернуть или развернуть все параметры в списке. Для поиска параметра используется поле *Поиск по параметру*, куда необходимо ввести имя параметра и нажать кнопку *Поиск*. Если такой параметр существует, он будет подсвечен в списке параметров. При необходимости ввода или изменения значения параметра следует выбрать ячейку рядом с ним и ввести нужное значение.

В правой части рабочей области на вкладке *Расчетная модель* располагается раздел *Библиотека материалов*, который содержит перечень файлов материалов. Эти файлы являются по сути заполненными моделями материала для различных типов моделей и их свойств по правилам решателя LS-DYNA. Чтобы добавить или удалить библиотечную модель, достаточно добавить файл модели материала в нужный каталог или удалить его.

Для добавления модели материала из *Библиотеки материалов* в расчетную модель необходимо выбрать его в списке и нажать кнопку *Добавить*, в результате он будет перенесен в раздел *Материалы* расчетной модели и добавлен в файл модели, который будет запущен на анализ.

Добавление в расчетную модель различных графиков нагрузок или кривых для параметров материала выполняется в разделе *Задание кривых и графиков*. После задания всех параметров

можно выполнить построение расчетной модели, для этого необходимо нажать на кнопку *Создать расчетную модель* на панели инструментов или в меню *Создание модели*.

Для проведения моделирования может быть недостаточно тех данных, которые программа сформировала для расчетной модели. Так, может потребоваться ручное задание нагрузок и ограничений, используя соответствующие команды и правила в пакете LS-PREPOST. Для этого можно открыть модель в препроцессоре, выбрав соответствующую команду *Открыть в LS-PREPOST*.

После выполнения всех действий по доработке модели средствами LS-PREPOST появляется возможность запуска на расчет, выбрав команду *Запустить на расчет* на панели инструментов или в меню *Расчеты*. Вслед за проведением расчета, на это укажет строка *Normal termination* в выполняемом файле, можно будет открыть результаты моделирования. Для этого нужно выбрать команду *Показать результаты*, после чего будет открыт файл результатов (3dplot) в постпроцессоре.

Для возможности вывода результатов расчета во внешние файлы используется команда *Вывести результаты*, после ее нажатия будет открыто окно, показанное на рис. 4. В данном окне следует указать файл результатов, из которого будут считаны данные (файл 3dplot), каталог, куда необходимо сохранить выходные файлы, ввести номера узлов, для которых данные будут выводиться численные значения, и выбрать тип результата для вывода в разделе *Вывод результатов*.

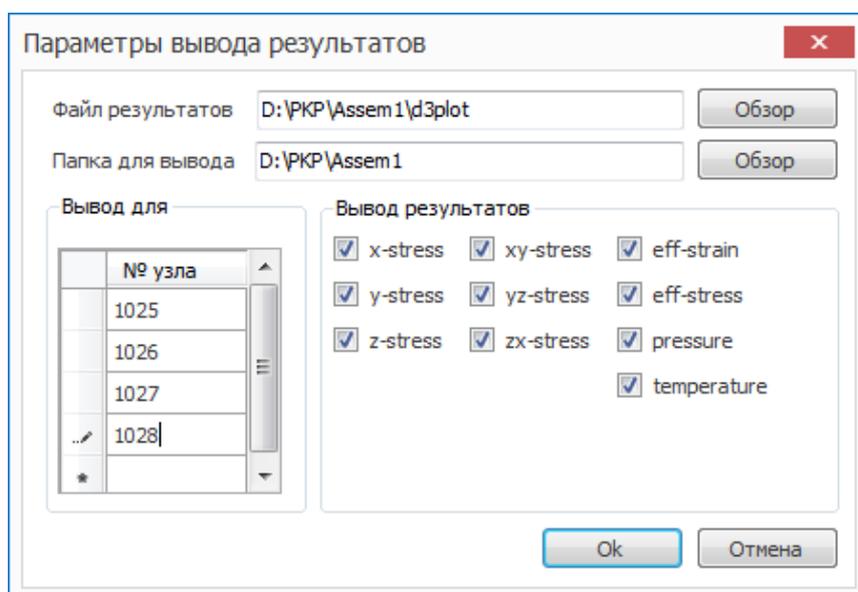


Рис. 4. Окно вывода результатов во внешние файлы

Fig. 4. Output window to external files

Для выбора доступны напряжения по трем осям X , Y и Z , касательные напряжения, эффективные напряжения и деформации, давление и температура. Вслед за нажатием кнопки *Ok* будет отработан скрипт, который запустит LS-PREPOST, откроет в нем модель и выполнит считывание всех данных, после этого они будут сохранены во внешний файл в формате XML.

Далее эти файлы возможно открыть в EXCEL и построить нужные графики. Не выходя из программы, можно создать новый проект. Для этого необходимо в меню *Файл* выбрать *Закрывать проект* и создать новый проект описанным выше способом.

Заключение. Разработано программное обеспечение для подготовки данных для компьютерного моделирования процесса ПКП на базе ANSYS/LS-DYNA. Программа позволяет существенно снизить требования к знаниям в области компьютерного моделирования у инженеров, занимающихся разработкой инструмента и техпроцессов для прокатки, оперативно создавать и изменять КЭ модели, проводить исследования ПКП для различных исходных данных техпроцесса и параметров решателя.

В статье предложена методика подготовки моделей для компьютерного анализа с помощью ПСПД. Рассмотрены основные этапы создания КЭ моделей в среде ANSYS/LS-DYNA, описаны функциональные возможности и приемы работы с ПСПД, а также приведен графический интерфейс программы.

Данное программное обеспечение использовалось как в научных целях, для исследования зависимости характера протекания процесса формоизменения при прокатке от технологических и геометрических параметров, так и для решения практических задач, в частности проведения экспериментальных расчетов для оптимизации реальных процессов ПКП.

Список использованных источников

1. Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя / К. А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
2. Hallquist, J. LS-DYNA theory manual [Electronic resource]. – Livermore Software Technology Corporation, 1998. – Mode of access: <https://www.dynamore.se/en/resources/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna-theory-manual>
3. Кожевникова, Г. В. Теория и практика поперечно-клиновой прокатки / Г. В. Кожевникова. – Минск: Беларуская навука, 2010. – 291 с.
4. Щукин, В. Я. Белорусская школа поперечно-клиновой прокатки / В. Я. Щукин, Г. В. Кожевникова // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 1. – С. 43–50.
5. Кожевникова, Г. В. Самоустановление сил трения при поперечной прокатке / Г. В. Кожевникова // Трение и износ. – 2016. – Т. 37, № 4. – С. 421–426.
6. Абрамов, А. А. Использование пакета LS-DYNA для компьютерного моделирования процесса поперечно-клиновой прокатки / А. А. Абрамов, Г. В. Кожевникова // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2011. – № 2. – С. 41–50.
7. Абрамов, А. А. Компьютерное моделирование процесса формообразования осесимметричных ступенчатых деталей методом поперечно-клиновой прокатки / А. А. Абрамов // Инновации в машиностроении: сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. В. Ю. Блюменштейна. – Кемерово: КузГТУ, 2015. – С. 424–428.
8. Introduction to the ANSYS Parametric Design Language: A Guide to the ANSYS Parametric Design Language / eds.: J. Strain, E. Miller. – PADT Inc., 2013. – 210 p.

References

1. Basov K. A. *ANSYS: User References*. Moscow, DMK Press Publ., 2005. 640 p. (in Russian).
2. Hallquist J. *LS-DYNA theory manual*. Livermore Software Technology Corporation, 1998. Available at: <https://www.dynamore.se/en/resources/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna-theory-manual>
3. Kozhevnikova G. V. *Theory and Practice of Cross-Wedge Rolling*. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2010. 291 p. (in Russian).
4. Shchukin V. Y., Kozhevnikova G. V. Belarusian Cross-Wedge Rolling School of Thought. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2016, no. 1, pp. 43–50 (in Russian).
5. Kozhevnikova G. V. Self-setting of forces of friction during cross rolling. *Journal of Friction and Wear*, 2016, vol. 37, iss. 4, pp. 324–329. <https://doi.org/10.3103/S1068366616040073>
6. Abramov A. A., Kozhevnikova G. V. Use of LS-DYNA for computer modeling of cross-wedge rolling process. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2011, no. 2, pp. 41–50 (in Russian).
7. Abramov A. A. Computer simulation of forming of axisymmetric multidiameter parts by cross-wedge rolling method. *Innovacii v mashinostroenii: sbornik trudov VII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Innovations in mechanical engineering: a Collection of works of the VII International Scientific and Practical Conference]. Kemerovo, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 2015, pp. 424–428 (in Russian).
8. Strain J., Miller E. (eds.). *Introduction to the ANSYS Parametric Design Language: A Guide to the ANSYS Parametric Design Language*. PADT Inc., 2013. 210 p.

Информация об авторе

Абрамов Андрей Андреевич – научный сотрудник, лаборатория предельной деформируемости и поперечно-клиновой прокатки, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: an-aj@ya.ru

Information about the author

Andrei A. Abramov – Researcher, Laboratory of Extreme Deformability and Cross-Wedge Rolling, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: an-aj@ya.ru