

УДК 621.771.014

Сухоруков С. И.  
Сивак И. О.  
Коцюбивская Е. И.

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗБИЕНИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ НА ТОЧНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ

В последние годы при проектировании и моделировании различных процессов ОМД все большее применение находят методы имитационного моделирования с помощью метода конечных элементов, как альтернатива экспериментальному исследованию и теоретическому анализу. При подготовке данных для моделирования необходимо задать данные о сопротивлении деформации материала заготовки, параметры контактного трения и т. д.

Точность выполнения расчетов при численном моделировании будет определяться не только достоверностью задаваемых исходных данных, но и корректностью построения математической модели [1–4].

Выбор типа конечных элементов является важной задачей, так как сильно влияет на эффективность и скорость расчета [5]. Многими исследователями замечено, что при увеличении числа степеней свободы, относящихся к элементу, уменьшается общее число степеней свободы системы, которое необходимо для достижения заданной точности.

Уменьшение размеров элементов улучшает сходимость метода конечных элементов существенней, чем увеличение порядка элементов. Причины этого в следующем:

1) влияние узловых переменных наиболее выражено в случае, если узловые точки совпадают с вершинами элементов, что наилучшим образом обеспечивается в линейных элементах, в которых все узлы лежат в вершинах;

2) из второго критерия сходимости выходит, что уменьшение размера элементов всегда приводит к увеличению точности решение за счет лучшей сходимости;

3) анализ быстропротекающих, нелинейных и нестационарных процессов ОМД для рассмотрения ряда последовательных этапов процесса требует разбиения поковки на мелкие элементы в областях с большими градиентами и резким изменением направления течения металла.

Целью работы является изучение влияния разбиения конечно-элементной модели на точность результатов моделирования процесса поперечно-клиновой прокатки (ПКП) (рис. 1).

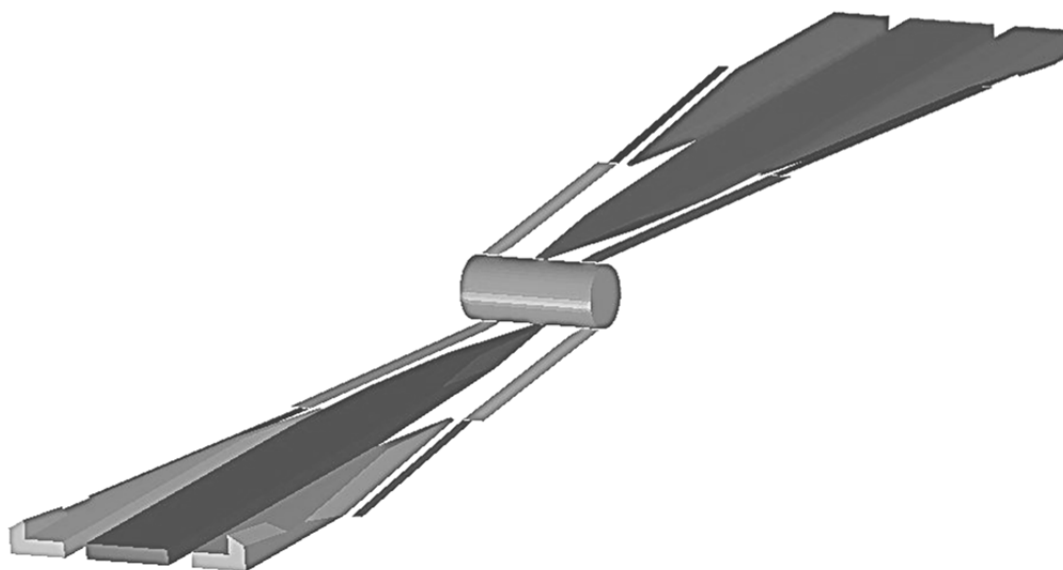


Рис. 1. 3d-модель инструмента и заготовки при плоской ПКП

Поперечно-клиновья прокатка – высокопродуктивная технология обработки металлов давлением. Основными преимуществами этого процесса является уменьшение расходов материала и повышения точности полученных заготовок. Данный процесс характерен тем, что в процессе формоизменения материал заготовки воспринимает большие пластические деформации (рис. 2, 3) [6, 7].

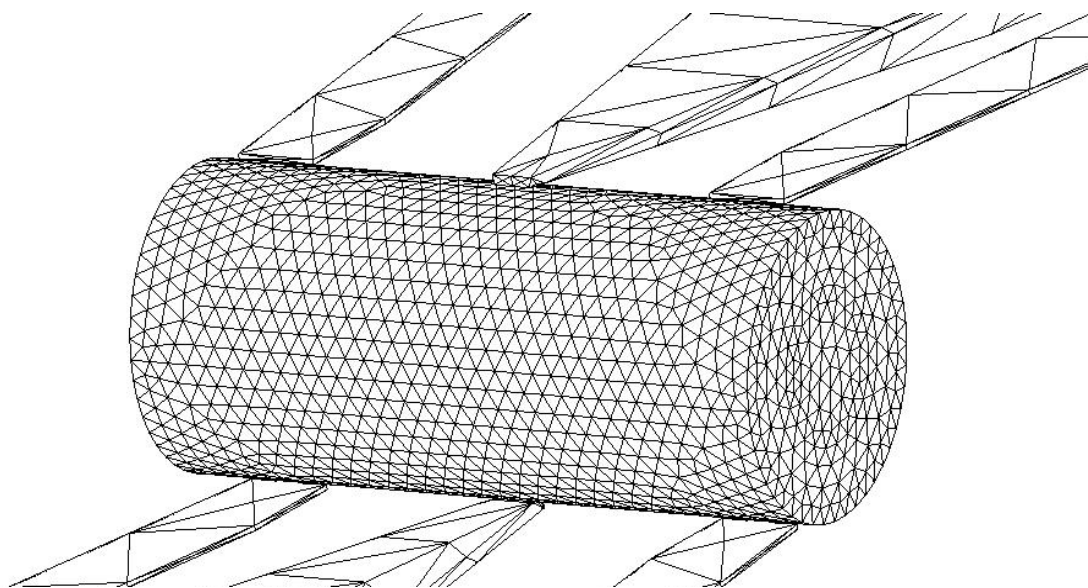


Рис. 2. Конечно-элементная модель заготовки (начальная форма)

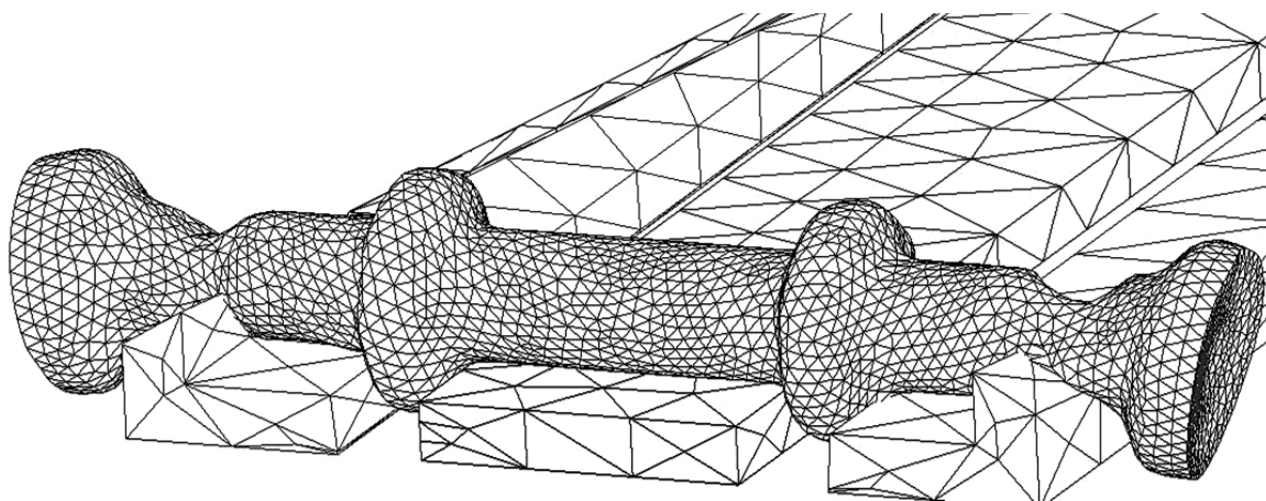


Рис. 3. Конечно-элементная модель заготовки (конечная форма)

Для построения модели и последующего анализа результатов имитационного моделирования использовали пре-постпроцессор LS-PREPOST Ver.3.0, который входит в состав пакета LS-DYNA 971 [8]. При разбиении модели инструмента и заготовки использовались 8-узловые конечные элементы, при этом при необходимости система автоматически объединяла некоторые вершины в одну, т. е. конечный элемент мог получиться как кубической формы, так и в форме тетраэдра или пирамиды.

Общее количество конечных элементов составило более 47 тысяч, при этом прогнозируемая продолжительность расчета процесса ПКП по построенной модели составила 16 часов.

В процессе моделирования в месте интенсивного формоизменения конечные элементы очень сильно деформировались (рис. 4), за счет резкого изменением направления течения металла. Для предотвращения данных явлений, негативно влияющих на достоверность имитационной модели процесса ПКП, необходимо проводить переразбиение конечно-элементной сетки в процессе расчета.

Наиболее эффективным, учитывая время обсчета и минимальный размер элемента, можно считать  $r$ -адаптивное переразбитие конечно-элементной сетки с возможностью задавать минимальный размер элемента при перестройке сетки [9].

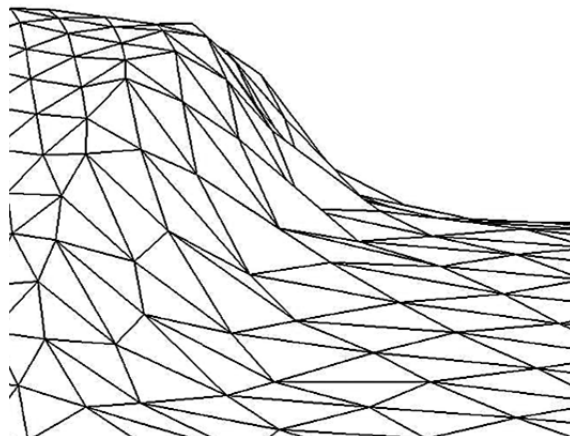


Рис. 4. Деформация конечных элементов в месте с наибольшим формоизменением

Переразбитие выполняется в такой последовательности:

- в заданное время останавливается расчет;
- определяются текущие значения перемещений и параметров напряженно-деформированного состояния узлов элементов;
- удаляются элементы и узлы с сохранением информации о перемещении и напряжении в узлах элементов;
- строится новая конечно-элементная сетка с учетом минимального размера элемента;
- используя аппроксимирующие функции, определяется значение перемещений и параметров НДС в узлах новой сетки;
- продолжается расчет до следующего переразбития.

Программа LS-DYNA позволяет выполнять  $r$ -адаптивное переразбитие конечно-элементной сетки не по всему объему деформированной заготовки, а лишь в местах с деформациями, которые достигли определенного значения (рис. 5, 6).

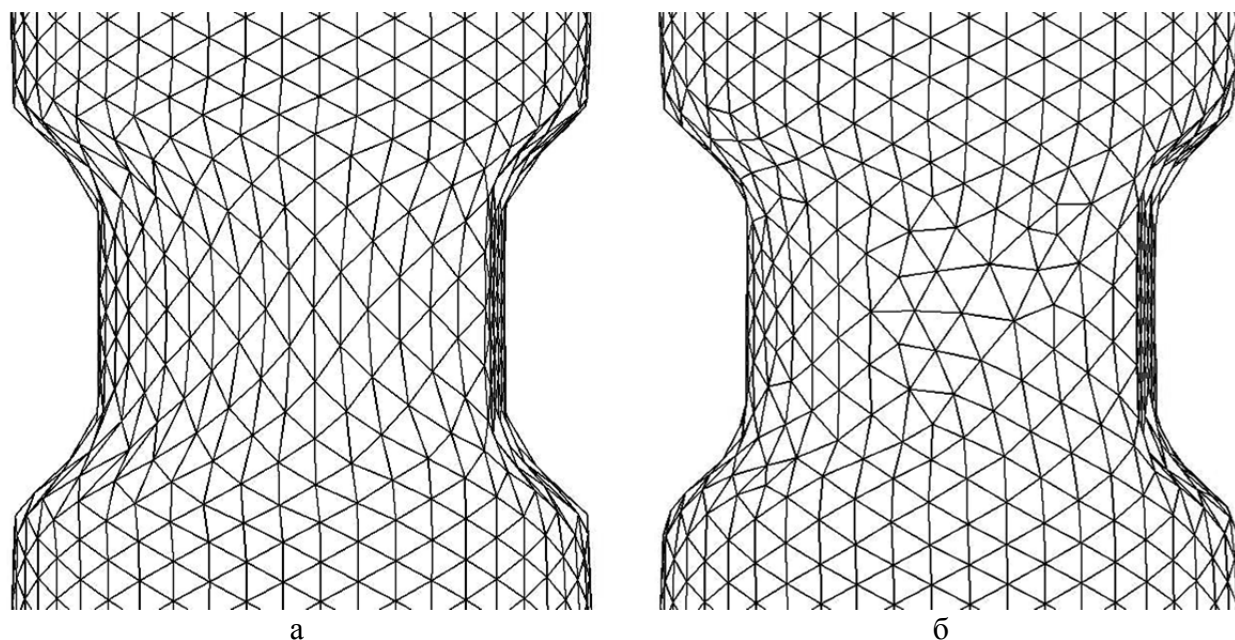


Рис. 5. Конечно-элементная сетка заготовки на этапе внедрения клина инструмента: а – без переразбития; б – с переразбитием

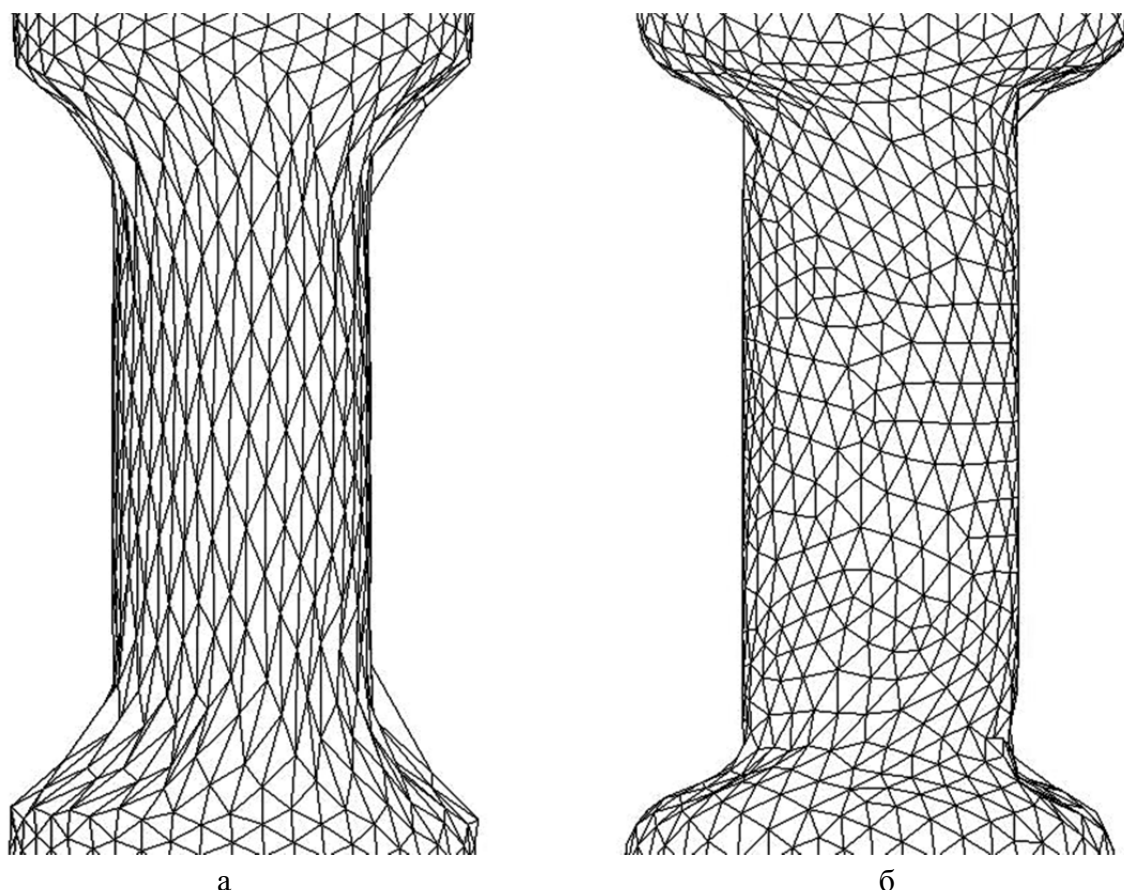


Рис. 6. Конечно-элементная сетка заготовки на этапе калибрования:  
а – без переразбития; б – с переразбитием

Основные параметры, которые влияют на качество получаемой сетки, включены в карты `*CONTROL_REMESHING` и `*CONTROL_ADAPTIVE`, которые отвечают за переразбитие [10, 11]. В данной работе применялись такие значения параметров, входящих в данные карты:

```
*CONTROL_REMESHING
```

```
$ rmin rmax
```

```
0.2 6
```

```
*CONTROL_ADAPTIVE
```

```
$ adpfreq adptol adpopt maxlvl tbirth tdeath lcadp ioflag
```

```
0.10000 0.000 7 0 0.4 0.000 0 1
```

где `rmin` и `rmax` – минимальный и максимальный размер создаваемого при переразбитии конечного элемента;

`adpfreq` – интервал времени между переразбитиями;

`adptol` – погрешность (в градусах) для параметра `adpopt`, значение которого принято равным 1 или 2. Если значение параметра `adpopt` равно 8, то в этом случае `adpopt` определяет характерный размер элемента.

`adpopt` –  $g$ -адаптивное переразбитие конечно-элементной сетки для 3D элемента при значении `adpopt` = 7;

`maxlvl` – максимальное количество уровней измельчения сетки. Значения 1, 2, 3, 4, ... позволяют получать соответственно 1, 4, 16, 64, ... элементов для каждого исходного элемента.

`tbirth` – время запуска процесса переразбития;

`tdeath` – время окончания процесса переразбития;

`lcadp` – интервал между адаптивными переразбитиями сетки изменятся как функция времени, заданная идентификатором кривой `lcadp`.

Анализ результатов имитационного моделирования процесса поперечно-клиновой прокатки, проведенного при помощи пакета LS-DYNA 971 (МКЭ), показал, что использование опции  $\gamma$ -адаптивного переразбития конечно-элементной сетки заготовки улучшает геометрическую точность полученной модели и корректность картины распределения напряжений и деформаций по телу заготовки. Так же удалось установить, что при моделировании процесса ПКП без  $\gamma$ -адаптивного переразбития значения параметров напряженно-деформированного состояния оказались завышенными на 10–15 %, что обусловлено большими деформациями в контактной зоне и сильным искажением конечно-элементной сетки заготовки.

## ВЫВОДЫ

При анализе влияния параметров разбиения конечно-элементной модели на точность результатов моделирования было установлено, что использование  $\gamma$ -адаптивного переразбития конечно-элементной сетки заготовки позволило улучшить качество имитационной модели процесса поперечно-клиновой прокатки. Так же установлено, что при моделировании данного процесса без переразбития конечно-элементной сетки происходит завышение значений параметров НДС на 10–15 %.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Расчеты процессов листовой штамповки при помощи конечно-элементного комплекса LS-DYNA 3D / А. В. Сатонин, З. А. Александрова, П. М. Стежкин, В. В. Смолякова // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 11–16.*
2. *Матвийчук В. А. Моделирование высадки торцевой раскаткой наружных буртов на трубных заготовках / В. А. Матвийчук, Л. И. Алиева, С. И. Сухоруков // Обработка металлов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 2 (21). – С. 46–51.*
3. *Шпак В. И. Конечно-элементное моделирование совмещенных процессов прокатки / В. И. Шпак, А. А. Сатонин, Е. С. Давыденко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 420–424.*
4. *Алиев И. С. Решение проблемы формоизменения математическим моделированием в процессе радиально-прямого выдавливания на оправке / И. С. Алиев, Я. Г. Жбанков, П. Абхари // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 26–36.*
5. *Рябичева Л. А. Особенности компьютерного моделирования технологических процессов обработки металлов давлением методом конечных элементов / Л. А. Рябичева, Д. А. Усатюк // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту. – 2005. – № 10. – С. 178–184.*
6. *Bartnicki J. Numerical simulation of three-rolls cross-wedge rolling of hollowed shaft / J. Bartnicki, Z. Pater // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – Vol. 164. – P. 1154–1159.*
7. *Pater Z. Numerical modelling of cross-wedge rolling process of ball pin / Z. Pater, J. Bartnicki, G. Samołyk // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 164. – P. 1235–1240.*
8. *Сухоруков С. И. Оцінка деформуємості заготовок при поперечно-клиновій прокатці / С. И. Сухоруков, К. И. Коцюбівська, І. О. Сивак // Наукові нотатки. – Луцьк, 2009. – № 25. – С. 272–275.*
9. *Гуменюк Ю. И. Применение перестроения сетки при конечноэлементном моделировании процесса холодного продольного выдавливания / Ю. И. Гуменюк, С. В. Даниленко, Д. В. Усманов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, – 2004.*
10. *Botticher R. Comparison of EFG and Standard Elements for Thermal-mechanical Metalforming Simulations. – 3. LS-DYNA Anwenderforum, 2004, Bamberg.*
11. *LS-DYNA Keyword User's Manual version 970. – Livermore Software Technology Corporation, 2006. – 1564 p.*

Сухоруков С. И. – канд. техн. наук, доц. ВНТУ;

Сивак И. О. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВНТУ;

Коцюбівська Е. И. – канд. техн. наук, доц. ВНТУ.

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винница.

E-mail: ssergeii@ukr.net

Статья поступила в редакцию 20.04.2012 г.