

Конечно-элементное моделирование процессов формообразования обтяжкой с помощью пакета программ ABAQUS

И. И. Тищенко

Воронежский государственный технический университет

Автор выражает благодарность фирме ООО «ТЕСИС», предоставившей право использования конечно-элементного пакета ABAQUS для проведения исследований (по академической лицензии). Работа проводилась в рамках исследований в ЦПО ТЕСТ.

Формообразование методом обтяжки – один из наиболее распространённых методов изготовления крупногабаритных обшивок в самолётостроении. Обтяжка заключается в натяжении на поверхность жёсткого инструмента (пуансона) первоначально плоской заготовки, зажатой на двух противоположных краях в зажимные устройства (см. рис.1). Размеры стороны заготовки обычно находятся в пределах 1000–8000 мм, толщина 1–10 мм. Некоторые обтяжные прессы дополнительно оснащаются так называемым «клювом» – цилиндрической формы приспособление, жёстко соединённое с зажимным устройством; клюв ограничивает максимальные углы изгиба заготовки в области выхода из зажимов, а также за счёт трения снижает деформации в этой области. В ходе процесса пуансон неподвижен, а формообразование осуществляется за счёт перемещения зажимов по определённым траекториям. Для получения оптимальных траекторий движения зажимов в работе использовалась методика, описанная в [2].

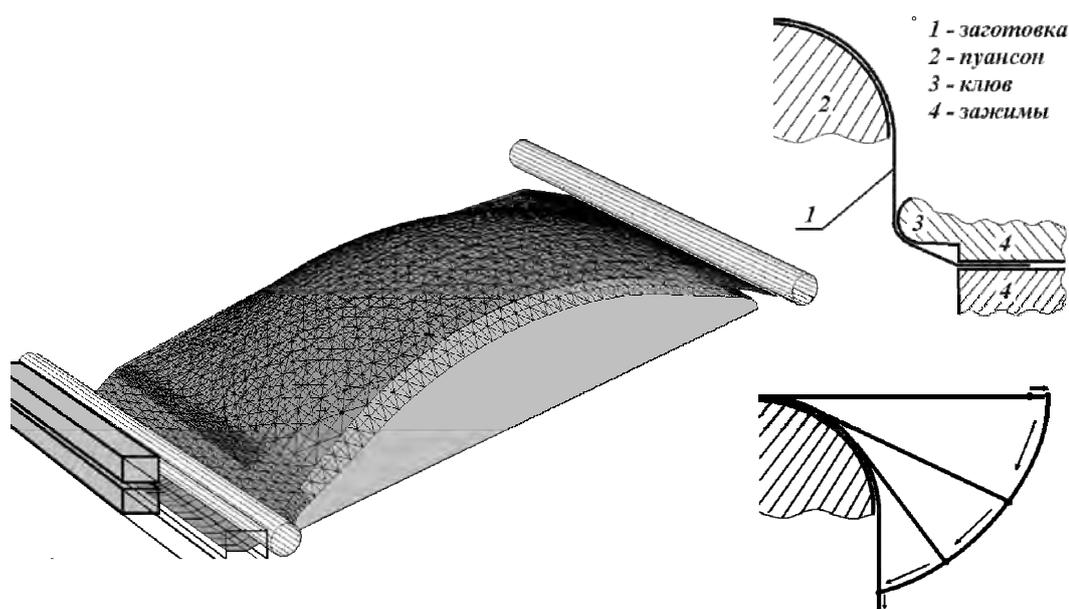


Рис.1. Схема процесса обтяжки и модели для его расчёта.

По устройству зажимного устройства выделяют две разновидности прессов: с прямолинейными зажимами и с криволинейными (многосекционными) зажимами (см. рис.2). Многосекционный зажим состоит из нескольких линейных секций, которые могут взаимно перемещаться. Каждая из секций зажимает лист без изгиба, но за счёт перемещения секций можно получить непрямую линию зажатия (*линией зажатия* здесь и далее будем называть границу, разделяющую часть листа в зажиме и вне его).

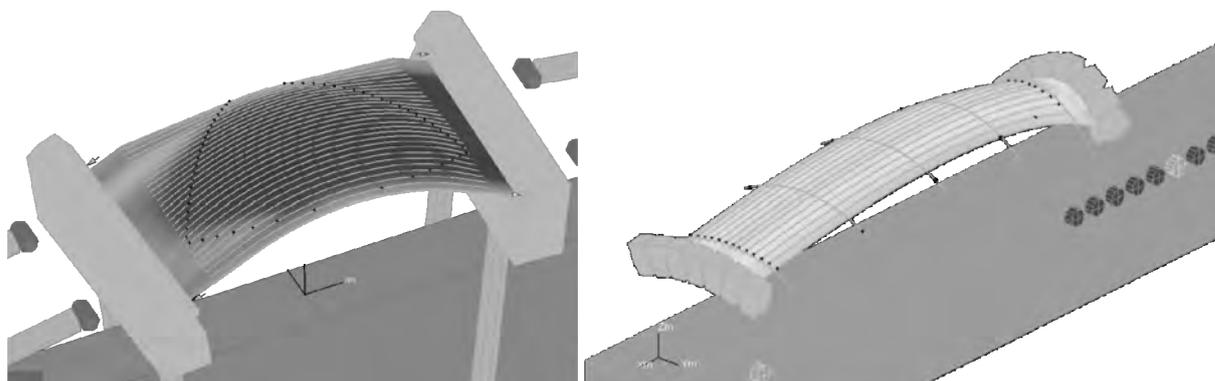


Рис.2. Пресс с односекционными (слева) и многосекционными (справа) зажимами.

При использовании многосекционного зажима в процесс добавляется ещё один этап. Первоначально зажимы располагаются горизонтально, и в них зажимается плоский лист. Затем зажимы смещаются, придавая линии зажатия требуемую форму. После этого процесс идёт аналогично односекционному зажиму.

Линия зажатия и область выхода заготовки из зажима являются зоной повышенной опасности – здесь наиболее высока вероятность разрыва заготовки. В случае криволинейных зажимов эта опасность усугубляется этапом искривления зажимов, который вносит дополнительные деформации заготовки между секциями зажимов.

Также объектом внимания являются процессы, происходящие после снятия с заготовки технологических усилий. В ходе процесса заготовка претерпевает и пластические, и упругие деформации, в общем случае распределённые неравномерно. В результате после освобождения заготовки из зажимов происходит перераспределение остаточных напряжений, что приводит к изменению формы заготовки и её отклонению от формы пуансона (пружинение). Нередко отклонение заготовки от формы пуансона оказывается настолько значительным (5–50 мм), что это приходится учитывать при проектировании процесса и оснастки, иначе отклонение заготовки от чертежей превысит допустимые пределы.

Была поставлена задача смоделировать данный процесс. Модель должна адекватно отображать существенные свойства процесса, в том числе:

- Напряжённо-деформированное состояние заготовки в каждый момент процесса.
- Параметры, связанные с возможными технологическими отказами: вероятность разрушения заготовки, потери устойчивости, возникновения гофров, чрезмерных или недостаточных деформаций.
- Точность соответствия полученной детали чертежу (пружинение).

Процесс разгрузки заготовки по своей природе является квазистатическим, и его надо моделировать с помощью процедуры ***STATIC** (ABAQUS/Standard). Были проведены эксперименты по моделированию разгрузки с помощью ***DYNAMIC, EXPLICIT** (ABAQUS/Explicit). Они показали, что, даже если удастся подобрать параметры процесса и наиболее оптимально использовать техники ускорения диссипации энергии, всё равно время перехода системы в состояние покоя будет гораздо дольше основной части процесса. Это неприемлемо, т.к. требует несоразмерно большого времени для расчёта модели.

В то же время, основная часть процесса – растяжение и оборачивание – процессы явно динамические, поэтому их надо моделировать с помощью процедуры ***DYNAMIC, EXPLICIT** (ABAQUS/Explicit).

Поскольку эти две процедуры (обтяжка и разгрузка) невозможно объединить в пределах одной модели, задачу пришлось разбивать на несколько моделей: «основная» модель, в которой рассчитывается растяжение/оборачивание, и модель разгрузки. Такое решение подразумевает передачу данных между ABAQUS/Explicit и ABAQUS/Standard. Для этого были использованы техники Import-анализа. Это также сказывается на выборе типов используемых конечных элементов, т.к. не все типы элементов поддерживаются в обоих продуктах.

Процессы в области зажатия также пришлось рассчитывать в отдельной модели. Причиной этого является тот факт, что для получения адекватных данных необходимо, чтобы средний размер конечных элементов в области выхода из зажимов был сравним с радиусами скруглений на краях зажима, т.е. порядка 1-10 мм. В то же время средний размер элемента в остальной области заготовки может быть порядка 30-150 мм, или даже больше. Если построить «основную» модель с достаточно хорошей сеткой в области зажатия, то, с одной стороны, в модели будет гораздо больше элементов, а с другой стороны минимальный характерный размер элемента будет мал (а он непосредственным образом влияет на инкремент по времени). В результате расчёт модели требует, опять же, слишком много времени.

Поэтому решено было сделать так. В основной модели зажатие заменить на граничные условия для узлов заготовки на линии зажатия (вращательные степени свободы не ограничиваются; часть заготовки, находящаяся в зажимах, не включается в модель). Принцип Сен-Венана, численные и натурные эксперименты подтвердили, что такое упрощение допустимо и не вносит существенных искажений в модель. А для расчёта процессов в области зажатия строится «модель зажимов», с детальной геометрией зажимов; при этом в модели участвует не вся заготовка, а только её часть в непосредственной близости от зажимов. Граничные условия для части заготовки, находящейся в зажимах, берутся из исходной постановки задачи; граничные условия на «линии отреза» строятся на основе расчёта основной модели: мы извлекаем из результатов основной модели траектории узлов, находящихся на этой линии, а затем задаём эти траектории как граничные условия для модели зажимов. При этом оказывается возможным исключить из модели зажимов контакт с пуансоном.

Итак, в результате задача разбита на три взаимосвязанных модели, см. рис.3.

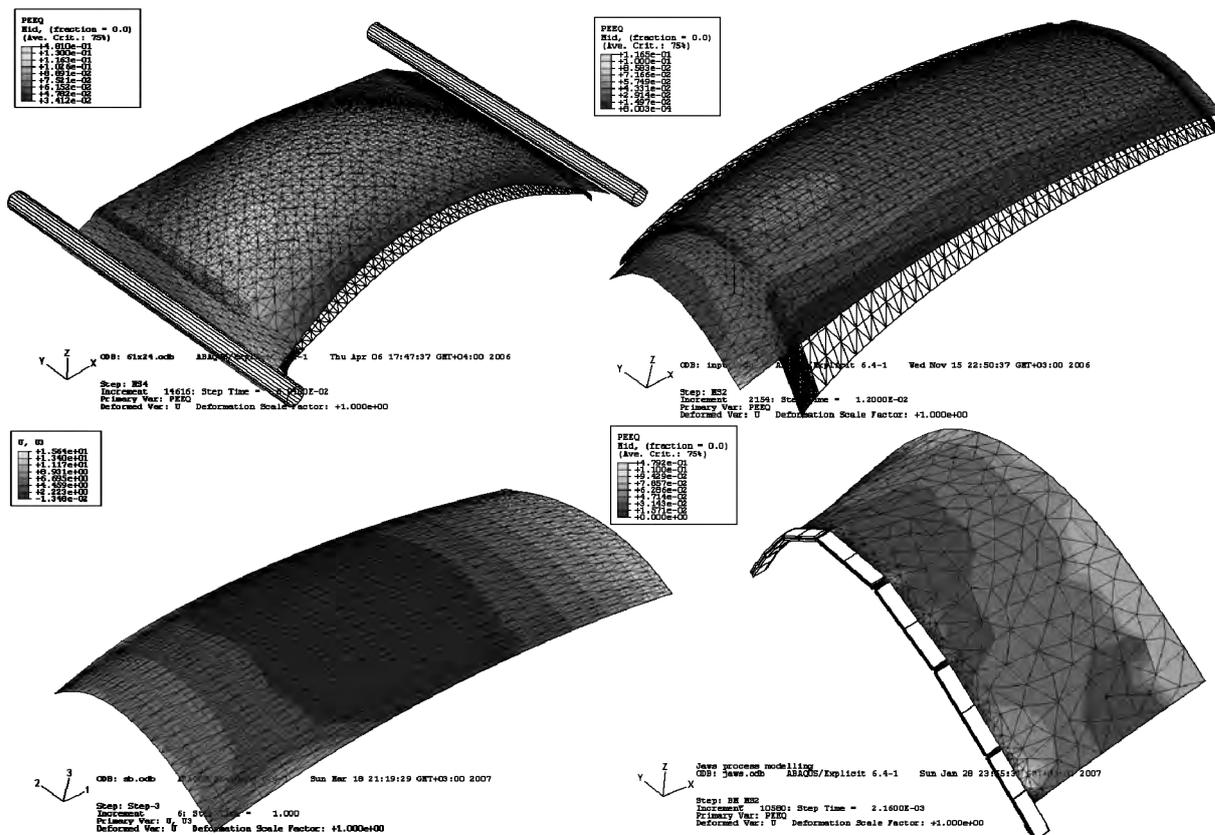


Рис.3. Субмодели, построенные для моделирования процесса обтяжки: основная модель (прямолинейные и криволинейные зажимы), модель пружинения, модель зажимов.

Выбор размера элемента.

Выбор размера элементов в первую очередь диктуется соображениями последующего использования получаемых результатов. Так, если необходимо получить распределение

деформации в некоторой области, то, очевидно, для этого необходимо использовать, скажем, хотя бы 10–15 элементов в каждом из направлений по этой области. В противном случае результаты будут слишком грубыми.

Однако, этих соображений недостаточно. Существует ещё один не менее важный критерий. Как известно, метод конечных элементов даёт лишь приближённое решение, которое при определённых условиях сходится к искомому. Можно сказать, что (в некоторых определённых случаях) решение будет приближаться к искомому с уменьшением размеров конечных элементов. Поэтому было предпринято дополнительное исследование сходимости. На рис.4 можно видеть его результаты: распределение интенсивности деформаций в центральном (слева) и краевом (справа) сечении заготовки. График слева показывает, что начиная с некоторого размера элемента колебание решения не превышает 2–5%, что является вполне приемлемым.

График справа показывает одну из проблем, которую автору пока не удалось преодолеть. Значения при 1770 по оси абсцисс соответствуют значениям деформаций в углу заготовки. Напряжённо деформированное состояние этой детали таково, что наибольшие напряжения возникают в диагональных направлениях. Поэтому в угловом элементе образуется сингулярность: с улучшением сетки значения деформаций в угловых элементах неограниченно растут. Проведённые численные эксперименты показали, что аналогичный эффект возникает практически во всех случаях растяжения листа с жёстко закреплёнными узлами в углах. Натурный эксперимент, однако, не показал наличия такого эффекта. С точки зрения практики знание поведения материала в этой области очень важно, т.к. часто заготовка разрушается именно в углах, на линии зажатия. Но эта «сингулярность» не позволяет делать какие-либо оценки. Хотя, как видно из графика, все элементы кроме углового лежат (с небольшими отклонениями) на одной кривой, но этот факт всё ещё не позволяет делать какие-либо заключения.

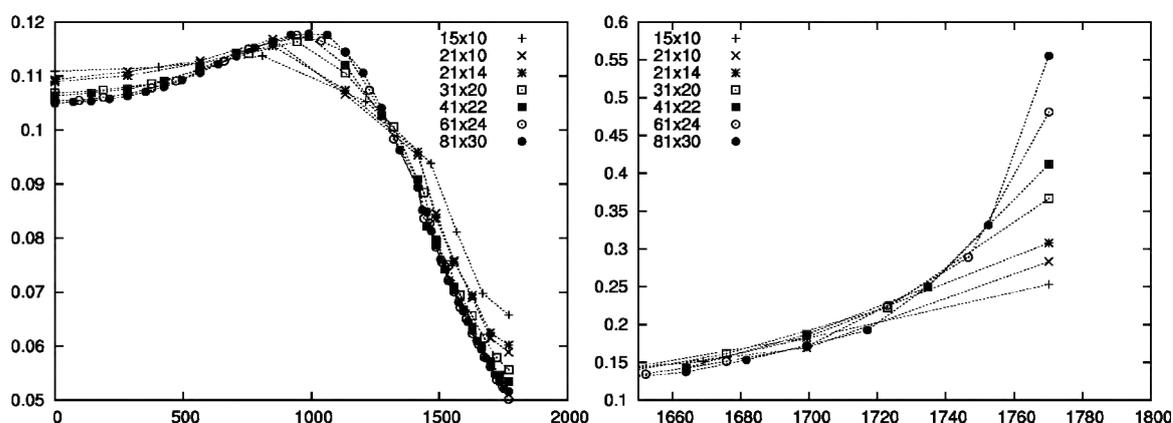


Рис.4. Интенсивность деформаций на центральном и краевом сечениях детали для различных сеток (размеров элементов).

Отдельной проблемой является выбор размера элемента на скруглениях. Геометрия оснастки такова, что на краях радиусы кривизны значительно меньше, чем на основной части. А контакт между поверхностью заготовки и оснасткой определяется таким образом, что допускается взаимное проникновение элементов, обеспечивается лишь не проникновение узлов сквозь поверхность. Поэтому в областях, где заготовка сходит с пуансона и контактирует с клювами, при грубой сетке может возникнуть проблема, проиллюстрированная на рис.5, выливающаяся в неестественное затруднение перетягивания заготовки через края оснастки и, как следствие, увеличение деформаций на свободных краях и в углах заготовки. Подсчёты и эксперименты показывают, что для уменьшения этого эффекта сетка должна быть такой, чтобы в области контакта углы между элементами не превышали 5.

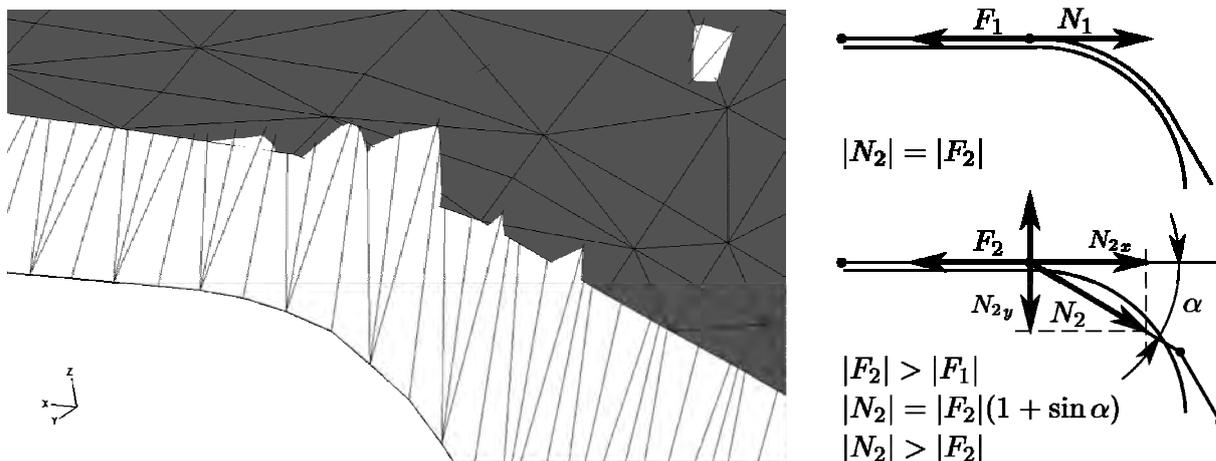


Рис.5. Проблемы, связанные с грубой сеткой на скруглениях с малыми радиусами.

Выбор типа элемента.

Как указано выше, при выборе типа элемента помимо прочего пришлось учитывать, что элемент должен поддерживаться как в Explicit, так и в Standard.

Заготовка имеет форму прямоугольника и естественным образом разбивается на прямоугольники, поэтому первоначально для моделирования использовались четырёхугольные оболочечные элементы первого порядка S4R. Однако как показало сравнение с экспериментом, применение S4R не позволяет с достаточной точностью определять значения пружинения. На деталях с большими радиусами кривизны с этим можно было как-то мириться, пытаться вводить поправочные коэффициенты. Однако для деталей с малыми радиусами кривизны (по сравнению с размерами заготовки) картина пружинения переставала соответствовать реальности даже качественно. Поэтому для одной из «сложных» деталей было предпринято исследование применимости типов элементов. Сложной деталью является потому, что на одном из её участков радиус кривизны составляет порядка 11 мм при размерах заготовки 920x3660 мм и толщине 1.2 мм. Помимо S4R были проверены элементы: S3R, continuum-shells элементы SC6R и SC8R, а также объёмные элементы C3D8R и C3D6.

Как оказалось, использование continuum-shells и объёмных элементов приводит к существенному увеличению времени расчёта, т.к. время расчёта находится в обратной зависимости от характерного размера элементов, а для этих элементов характерным размером является толщина. Кроме того, при использовании объёмных элементов их количество должно быть существенно увеличено по сравнению с оболочечными.

Из сравнения же элементов S4R и S3R оказалось, что результаты пружинения у треугольных элементов гораздо ближе к реальности, чем у четырёхугольных. Поэтому в дальнейшем было решено использовать элементы S3R с улучшенной, где необходимо, сеткой.

В силу ряда причин, было принято решение не использовать CAE для построения модели. Основными причинами явились: импорт геометрии оснастки и построение на ней сетки, импорт граничных условий по перемещениям, неполная поддержка в CAE возможностей решателя. Поэтому для подготовки input-файла с описанием модели для расчёта разработан пакет скриптов на языке Python. Для построения сетки на простых областях использовались элементарные алгоритмы; для более сложных моделей (например, для модели зажимов, где требуется довольно изошрённая сетка) использовалась методика [1].

Поскольку для передачи данных между основной моделью и моделью пружинения использовалась техника Import-анализа, возникла возможность решать дополнительные задачи. Так, при импортировании данных из основной модели, можно отбросить часть элементов. Для расчёта пружинения отбрасываются элементы оснастки; однако если отбросить часть элементов детали, можно смоделировать поведение детали при обрезке. Правда, при этом появляется один нюанс: для этого необходимо при описании основной

модели заранее спланировать, какие части заготовки придётся отбрасывать, т.к. импортировать можно только те наборы элементов, с которыми ассоциированы section property; удалить произвольную часть заготовки без перерасчёта основной модели таким образом невозможно.

Среди нерешённых автором проблем можно указать проблему введения гравитации в модель пружинения. Дело в том, что при её введении уже недостаточно жёсткого закрепления одной точки заготовки. Необходимо импортировать геометрию пуансона и моделировать полную контактную задачу. Попытки это сделать не увенчались успехом, т.к. очень быстро решатель уходит в «бесконечный цикл», пытаясь разрешить контакт между заготовкой и пуансоном – малейшее изменение формы заготовки вызывает значительные изменения области контакта, что не позволяет решателю закончить работу за обозримое время. Использование же для этой задачи Explicit, как было сказано выше, также неприемлемо – оно требует много ресурсов и не гарантирует достижения равновесия.

Выполнение заготовки из зажимов в модели зажимов – другая нерешённая пока проблема. Она заключается в том, что не найден способ описания средствами ABAQUS условий контакта между заготовкой и зажимами. Были испробованы: увеличение усилия зажатия, увеличение силы трения, указание в interaction property такого определения контакта, при котором запрещено взаимное перемещение поверхностей. Ни один из этих вариантов не предотвращает выскальзывания заготовки из зажимов.

Выводы. В рамках работы построена и рассчитана комплексная модель процесса обтяжки с помощью пакета программ ABAQUS. Для построения модели подготовлен пакет скриптов на языке Python [4]. Рассмотрен ряд вопросов, связанных с построением модели, проведены дополнительные численные эксперименты, и в результате выработаны рекомендации и методики по конечно-элементному моделированию процесса обтяжки. В числе прочих были рассмотрены следующие проблемы:

- Выбор типа и размера конечных элементов, дающий наиболее выгодный компромисс между адекватностью/точностью результатов и ресурсоёмкостью.
- Вопросы построения сетки; рассмотрена возможность построения сеток без помощи ABAQUS/CAE, например, с помощью методики [1].
- Включение в модель определений для учёта ряда физических эффектов, оказывающих влияние на ход и результат процесса. В том числе краевые эффекты [3] и эффекты изменения формы заготовки в результате перераспределения напряжений при снятии технологических усилий.
- Способ разбиения задачи на подмодели с целью повышения эффективности расчёта и обработки результатов.
- Вопросы эффективности и автоматизации процесса подготовки моделей.

Литература

1. Jonathan Richard Shewchuk, "Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator," in Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering (Ming C. Lin and Dinesh Manocha, editors), volume 1148 of Lecture Notes in Computer Science, pages 203-222, Springer-Verlag, Berlin, May 1996. (From the First ACM Workshop on Applied Computational Geometry.)
2. Одинг С. С., Управление процессом формообразования обшивок двойной кривизны на обтяжном оборудовании с программным управлением // Изв. Вузов. Авиац. Техника. – 1987. – № 3. – с. 47-51, – № 4. – с. 39-43.
3. Одинг С. С., Некрасов Ю. В., Тищенко И. И., Исследование влияния краевого эффекта на предельные параметры обтяжки листовых материалов. Авиакосмические технологии «АКТ-2005»: Труды 6-й международной научно-технической конференции . Ч. 2. Воронеж: ВГТУ, 2005.
4. <http://www.python.org>, Official Python Home Page (официальный сайт группы разработчиков интерпретатора языка Python).