

УДК 621.7.043

**РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ
МЕТОДОМ ИНКРЕМЕНТАЛЬНОЙ ФОРМОВКИ**

Елена Александровна Рукавичко

*Магистр 1 года,
кафедра «Технологии обработки давлением»
Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана*

*Научный руководитель: В.А.Кривошеин
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии обработки давлением»*

Ключевые слова: инкрементальная формовка (*incremental forming*), модернизация (*improvement*), локализация (*localization*), пластическая деформация (*plastic strain*), моделирование (*simulation*).

Аннотация: В работе представлено исследование формоизменения листовых материалов посредством инкрементальной формовки. В отечественной литературе данный процесс не рассмотрен и нет данных по эффективности способа, поэтому проведен литературный обзор зарубежной литературы по применению данной технологии. Предложены и исследованы методы деформирования и траектории движения инструмента, на основании которых делается выбор наиболее подходящих схем и траектории, для получения полусферических деталей. Разработана методика моделирования процессов инкрементальной формовки в программном комплексе *Abaqus*. Проведено моделирование, проанализированы полученные результаты. Сделаны выводы о перспективе использования процесса инкрементальной формовки.

Основой успешного развития современного производства является возможность быстрого удовлетворения требований заказчика. В настоящее время проблема производства деталей сложных форм в условиях единичного и мелкосерийного производства решается обычно с использованием большого числа технологических операций, выполняемых вручную. В данной работе рассмотрена технология инкрементальной формовки, благодаря которой становится возможным быстрое реагирование на потребности заказчика.

Инкрементальная формовка – это новый процесс обработки листового материала, в котором заготовка локально деформируется пуансоном со сферическим торцом путем перемещения одного или нескольких инструментов вдоль заданного направления (рис.1.). На рис. 1. представлены основные компоненты процесса; (I) заготовка тонколистового металла, (II) прижим, (III) опорная пластина и (IV), вращающийся со сферическим торцом пуансон. Прижим используется для зажима и удерживания листа в фиксированном положении во время инкрементальной формовки. Опорная плита поддерживает лист и его открытие определяет рабочую область пуансона. Подвижный инструмент используется для постепенного формирования листа в деталь и управляется посредством ЧПУ. Кроме перемещения вдоль заданного пути для снижения влияния сил контактного трения пуансон вращается вокруг своей оси. Технология позволяет работать с конструкционными, нержавеющими, высокопрочными и оцинкованными сталями, цветными металлами, титаном и с другими материалами. [1]

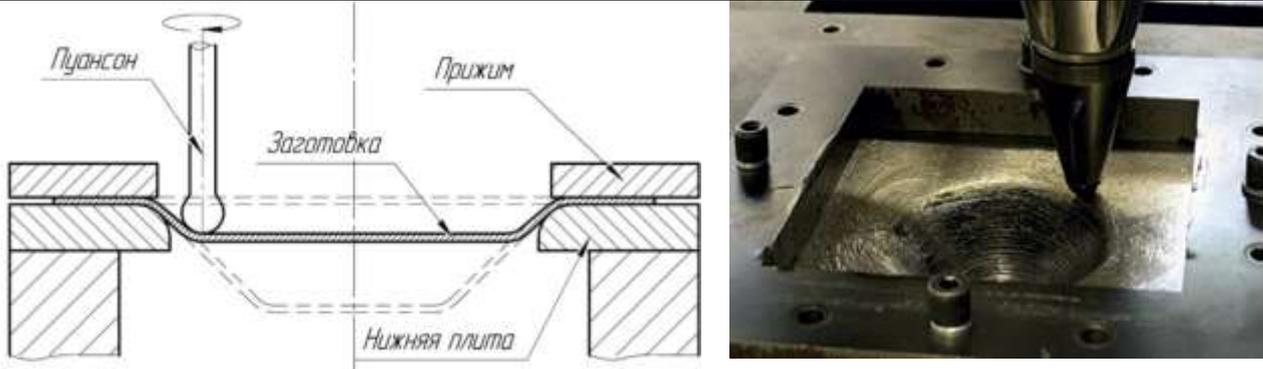


Рис. 1. Принципиальная схема инкрементальной формовки

Отличие от традиционных схем листовой штамповки заключается в том, что отсутствует штамповая оснастка и мощное прессовое оборудование. Деталь получается не за счет совмещения верхней и нижней частей штампа, а за счет реализации перемещения инструмента по заданному контуру по ранее рассчитанным режимам. На рис. 2. представлены традиционная и предлагаемая схемы штамповки. Во время процесса формовки инструмент используется для постепенного формирования листа в деталь и его траектория задается с обрабатывающего центра ЧПУ. На рис. 2,а. представлена традиционная схема формовки, процесс которой происходит в следующие этапы: 1) проектирование формы; 2) моделирование изделия в различных программных комплексах и разработка технологического процесса; 3) проектирование оснастки 4) изготовление оснастки; 5) наладка и установка оборудования; 6) штамповка на линии; 7) получение готового изделия. На рис. 2,бю представлена схема инкрементальной формовки: 1) проектирование формы; 2) моделирование изделия в программном комплексе; 3) изготовление изделия на универсальном оборудовании; 4) получение готового изделия. Исходя из этого процесс проектирования инкрементальной формовки уменьшает временные и материальные затраты при изготовлении изделия.

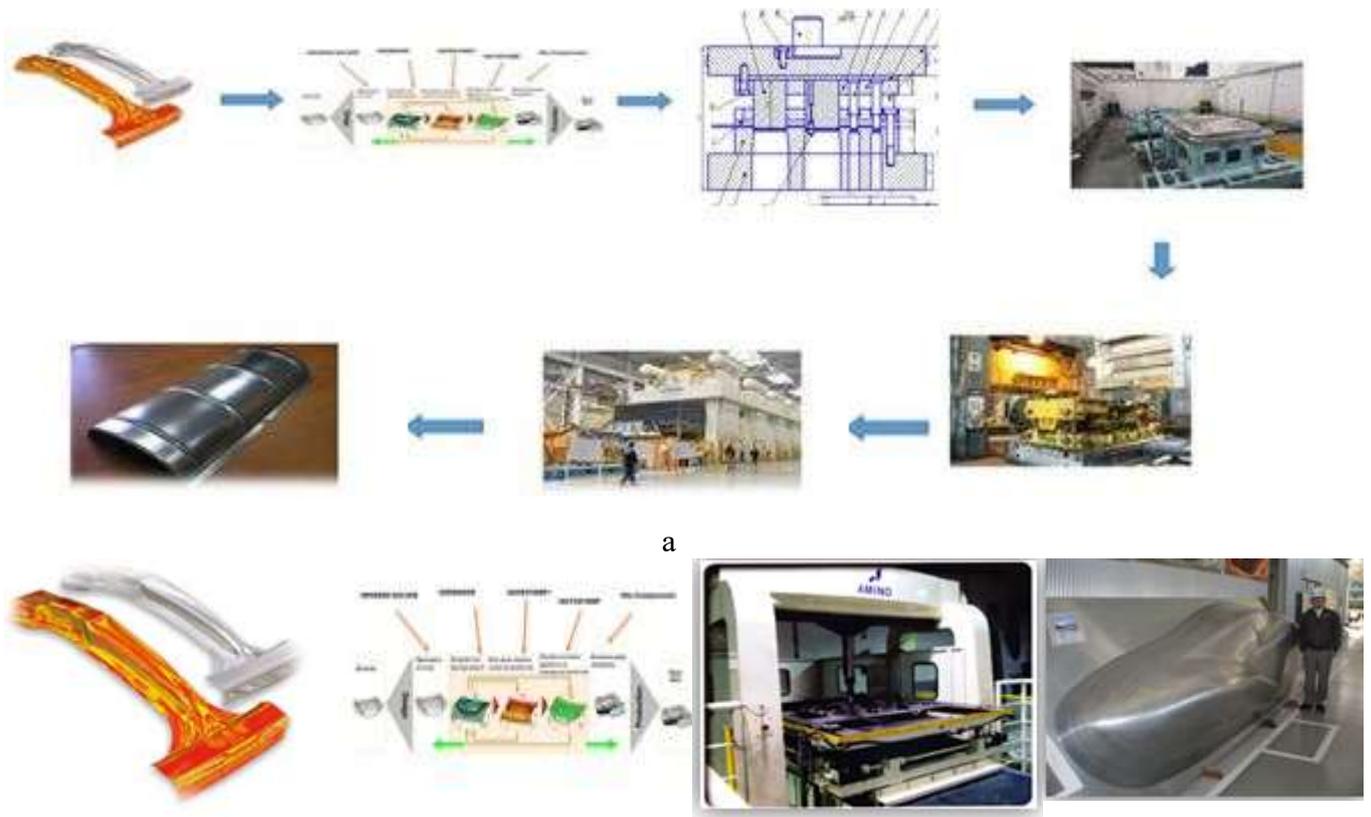


Рис. 2. Схемы штамповки: а) традиционная схема; б) схема инкрементальной формовки

Объектом исследования в работе является деталь типа полусферы, представленная на рис. 3. Основной проблемой получения деталей данного типа является разнотолщинность получаемого изделия. Решение проблемы становится возможным за счет того, что в технологии инкрементальной формовки очаг пластической деформации локализован около деформирующего инструмента.

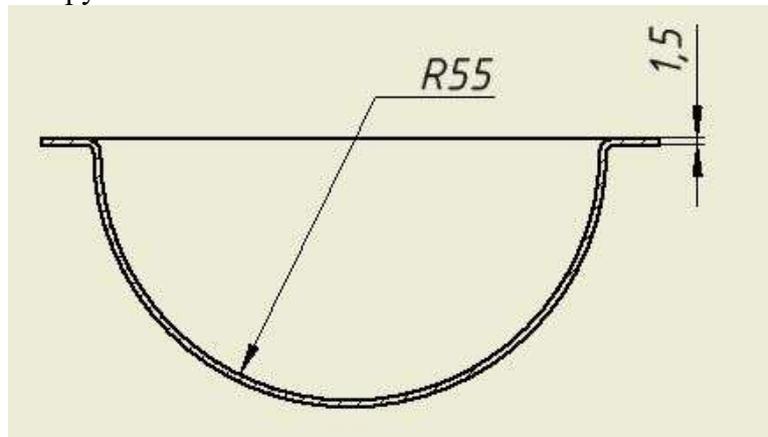


Рис. 3. Исследуемая деталь

Для получения изделий методом инкрементальной формовки предлагаются следующие схемы деформирования:

- поэтапное расширение;
- метод двух путей.

Метод поэтапного расширения представляет собой процесс, в котором инструмент формирует изделие за ряд небольших последовательных шагов. Формовка происходит за счет того, что пуансон движется по трем координатным осям небольшими шагами, образуя конечную форму. Метод двух путей заключается в том, что на первом этапе образуется конус, а на втором формируется полусфера. Данная схема деформирования влияет на распределение толщины вдоль конечного изделия.

Так как при инкрементальной формовке инструмент имеет сложную траекторию движения, то для моделирования операции будем использовать пакет программы Abaqus, основанный на расчете методом конечных элементов. Для создания проекта в данном программном комплексе необходимо следовать следующей методике:

1. Подготовка моделей инструмента и заготовки.
2. Выбор стратегии деформирования:
 - выбор схемы деформирования;
 - задание точек перемещения в Excel;
 - проверка траектории в Wolfram Mathematica.
3. Задание параметров моделирования:
 - реология материала (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность, кривая упрочнения);
 - параметры расчета (количество конечных элементов, граничные условия, величина шага, время деформирования, амплитуды движения инструмента).
4. Анализ результатов полученной детали:
 - форма;
 - толщина;
 - деформации и напряжения.

При определении размеров инструмента, необходимо основываться на габаритных размерах получаемого изделия. При достаточно большом радиусе скругления пуансона очаг пластической деформации не будет локализован, а при малом радиусе пуансона контакт с

поверхностью заготовки будет практически отсутствовать. Радиус скругления необходимо выбирать из диапазона 0,05-0,08 $R_{заг}$.

Рассмотрим первый способ деформирования - поэтапное расширение за несколько проходов. Проверку траектории движения инструмента для данного метода проводим в программном комплексе WolframMathematica, полученные амплитуды движения представлены на рис. 4.

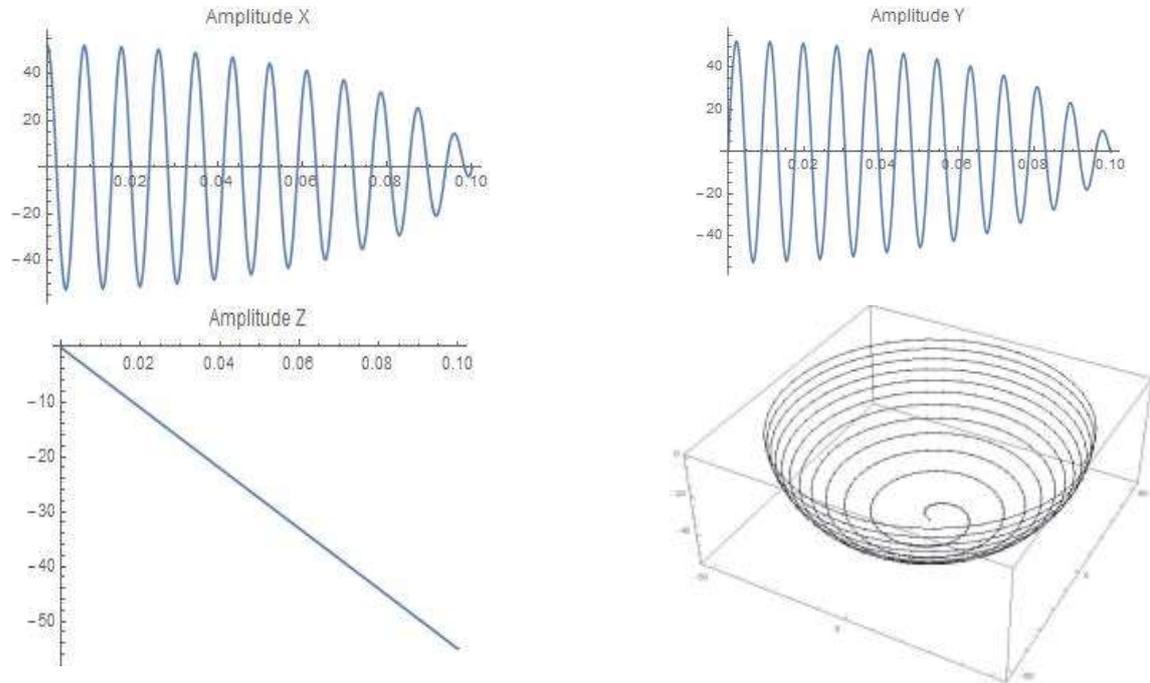


Рис. 4. Амплитуды движения инструмента по: а) X; б) Y ; в) Z ; г) траектория в координатах XYZ

Моделирование процесса инкрементальной формовки полусферического изделия было проведено в программном комплексе Abaqus. Результаты распределения толщины по детали, представлены на рис. 5. На рис. 6. представлен график зависимости толщины изделия в радиальном направлении заготовки, по которому видно, что толщина изделия уменьшается с увеличением радиуса, но ближе к вершине полусферы толщина вновь приобретает исходное значение. По полученным результатам можно сказать, что при самой простой схеме деформирования, и самой тривиальной траектории движения инструмента максимальное утонение составляет 40 % .

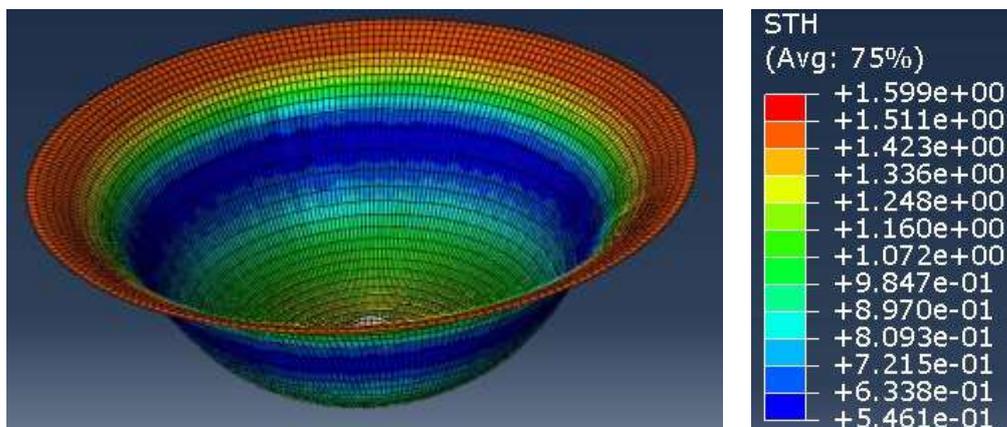


Рис. 5. Распределение толщины по полусфере

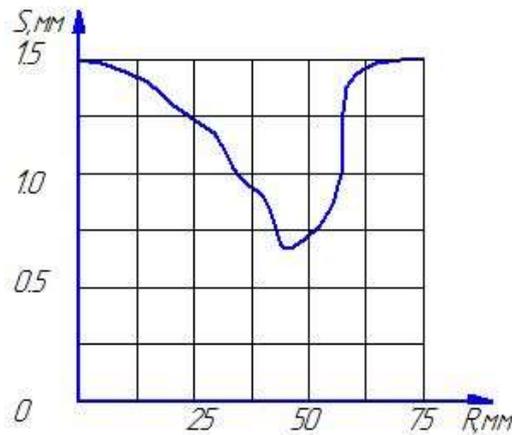


Рис. 6. График зависимости толщины изделия от радиуса полусферы

На рис. 7. представлена диаграмма предельных деформаций для используемого материала. По результатам моделирования, используя полученные главные максимальные и минимальные деформации, можно построить точки на FLD-диаграмме. Видно, что полученные точки выходят за кривую предельных деформаций, но так как в процессе инкрементальной формовки очаг локализован около пуансона, то для оценки возможного разрушения используется предельная линия трещинообразования (FFL). Для того чтобы получить предельную линию трещинообразования проводится эксперимент на нескольких образцах с различными деформированными состояниями. Предельная линия трещинообразования основывается на измерении толщины образца до и после образования трещины в нескольких точках вдоль трещины. На основе этих измерений определяются предельные деформации, и строится FFL. [18] На рис. 7. представлен предположительный вид прямой, полученный по теоретическим данным. Точки распределения деформаций по детали не выходят за FFL, следовательно, можно сказать, что разрушения при получении полусферы методом инкрементальной формовки не будет.

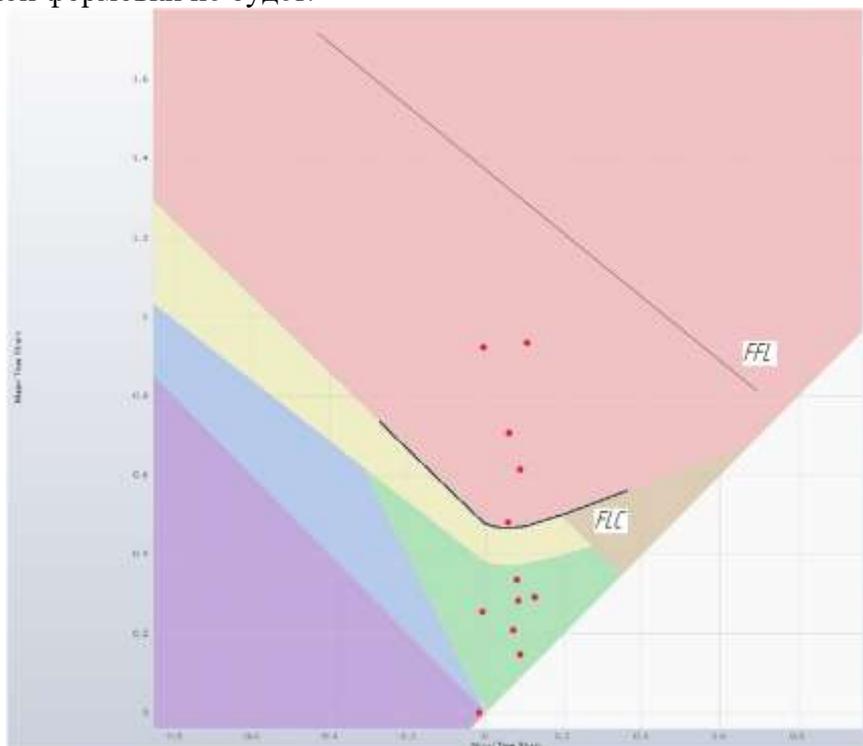


Рис. 7. FLD- диаграмма предельных деформаций

Выводы:

1. Технология инкрементальной формовки является актуальной, так как позволяет увеличить предельную степень деформации заготовки и уменьшить время подготовки производства.
2. Обзор литературных источников показал, что методика расчета технологического процесса отсутствует, а так же нет данных по критериям разрушения для деталей типа полусфера.
3. Программный комплекс Abaqus позволяет проектировать детали сложной формы, и задавать любую траекторию движения инструмента.
4. На основе предварительных результатов моделирования можно сказать, что при использовании самой простой схемы деформирования и самой тривиальной траектории движения инструмента, можно получить максимальное утонение равное 40 %.

Литература

1. *Кривошеин В.А., Анцифиров А.А., Майстров Ю.В.* Перспективы развития технологий инкрементальной формовки в современном производстве. 2014, №11
2. *Кривошеин В.А.* Интенсификация процесса обжима посредством выбора геометрии поверхности контакта заготовки с матрицей. Заготовительные производства в машиностроении, 2011, № 6, с. 15–18.
3. *Кривошеин В.А.* Теоретический расчет силы при обжиге в профилированной матрице. Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011, № 9.
4. *Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н.* Технология и автоматизация листовой штамповки. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 480 с.
5. *Шутиков А.А.* Моделирование предварительного перехода при пневмоформовке в состоянии сверхпластичности. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2014, № 2, с. 34–40.
6. *Kitazawa, K., Wakabayashi, A., Murata, K., Yaejima, K.* Metal flow phenomena in computerized numerically controlled incremental stretch – expanding of aluminum sheets. Journal of Japan Institute of Light Metals, vol. 46, pp. 65-70, 1996.
7. *Kitazawa, K., Nakane, M.* Hemi-ellipsoidal stretch expanding of aluminum sheet by CNC incremental forming process with two path method. Journal of Japan Institute of Light Metals, vol. 47, pp. 440-445, 1997.
8. *Kitazawa, K.* Limit strains for CNC incremental stretch-expanding of aluminum sheets. Journal of Japan Institute of Light Metals, vol. 47, pp. 145-150, 1997.
9. *Matsubara, S.* Incremental Backward Bulge Forming of a Sheet Metal with a Hemispherical Tool. Journal of the JSTP, vol. 35, pp. 1311-1316, 1994.
10. *Martins P.A.F., Bay N., Skjoedt M., Silva M.B.* Theory of single point incremental forming. CIRP Annals – Manufacturing Technology, vol. 57, pp. 247-252, 2008.
11. *Silva M.B., Skjoedt M., Atkins A.G., Bay N., Martins P.A.F.* Single Point Incremental Forming/ Formability / Failure Diagrams. Journal of Strain Analysis for Engineering Design 43(1): 15-36, 2008.
12. *Jeswiet J, Micari F., Bramley A., Dufloy J., Allwood J.* Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. Annals of CIRP 54(1): 623-650, 2005.
13. *Ham M., Jeswiet J.* Single Point Incremental Forming and the Forming Criteria for AA3003. Annals of CIRP 55(1): 241-244, 2006.
14. *Батурин Д. А.* Хроника развития основных способов послойного деформирования. Кузнечно-Штамповочное производство. Обработка Материалов давлением. №2, стр. 43-47, 2015.
15. *Emmens W.C., Sebastiani G., van den Boogaard A. H.* The technology of Incremental Sheet Forming – A brief review of the history / Journal the University of Twente, Netherlands.

16. *Mason B.* Sheet metal forming for small batchers; Bachelor thesis, Univ. of Nottingham. May 1978.
17. *Mason B., Appleton E.* Sheet metal forming for small batches using sacrificial tooling; Proc. 3rd Int. Conf. on Rotary Metal working, Kyoto, Japan. 1984. Pp. 495-511.
18. *Martins PAF, Montanari L, Cristino VAM, Silva MB* Formability and simulative tests in modern sheet metal forming education. Modern mechanical engineering: materials forming, machining and tribology. Springer . 2014. Pp. 411–447.