

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

© 2021

- Ф. В. Гречников** академик РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва;
- научный руководитель;  
Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук;  
[gretch@ssau.ru](mailto:gretch@ssau.ru)
- С. В. Сурудин** кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории пластического деформирования специальных материалов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва;
- старший научный сотрудник;  
Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук;  
[innosam63@gmail.com](mailto:innosam63@gmail.com)
- Я. А. Ерисов** доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва;
- старший научный сотрудник;  
Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук;  
[yaroslav.erisov@mail.ru](mailto:yaroslav.erisov@mail.ru)
- Р. Де Алваренга** научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории пластического деформирования специальных материалов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва;  
[roberto@grupoatua.com.br](mailto:roberto@grupoatua.com.br)

Дана оценка современного состояния и тенденций развития теории и технологии процесса инкрементального формообразования – перспективного технологического процесса для быстрого прототипирования деталей из листовых заготовок. Описаны основы процесса и оборудование для его реализации, механизм деформации при инкрементальном формообразовании. Описано разработанное решение для экспорта траектории движения деформирующего инструмента из САМ в САЕ систему.

*Инкрементальное формообразование; деформированное состояние; предельные деформации; оборудование; способы; моделирование*

---

*Цитирование:* Гречников Ф.В., Сурудин С.В., Ерисов Я.А., Де Алваренга Р. Современное состояние теории и технологии инкрементального формообразования // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 3. С. 119-137. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-119-137

### Введение

Основой успешного развития современного производства является возможность быстрого удовлетворения требований заказчика. При производстве изделий, в том числе сложной формы, из листовых заготовок используется большое количество штамповой оснастки, проектирование, изготовление, обслуживание и хранение которой требу-

ет значительных финансовых вложений. Более того, установка и наладка штампов на гидравлических и кривошипных прессах является трудоёмким процессом и требует определённого штата вспомогательного персонала. Если в условиях массового и крупносерийного производства данные затраты окупаются за счёт большой программы выпуска продукции, то при единичном и мелкосерийном производстве, к которым относятся авиационная отрасль и ракетостроение, расходы на штамповую оснастку значительно увеличивают себестоимость изделий. При этом имеют место случаи, когда штамповая оснастка используется всего несколько раз.

В связи с этим остро стоит вопрос перехода на новые технологии, позволяющие оперативно и гибко осуществлять переналадку оборудования с изделия на изделие и использовать универсальный инструмент, подходящий для всей номенклатуры деталей. Одной из таких технологий является инкрементальное формообразование (ИФ), суть которого заключается в локальном поэтапном деформировании отдельных частей листовой заготовки по заданной программе. Применение технологии ИФ позволяет быстро реагировать на изменение производственной программы при значительном снижении трудоёмкости подготовки производства и затрат на штамповую оснастку. Кроме того, реализация гибкого подхода к производству изделий на основе ИФ позволяет быстро проводить прототипирование изделий, что может использоваться и в массовом производстве, например в автомобилестроении при разработке концептов, а также в медицине, архитектуре, дизайне и т.д.

Анализ литературы показал, что технологии ИФ широко изучаются за рубежом и успешно внедряются в производство уже многие годы. Однако для разработки технологии и исследования влияния режимов процесса на поведение металла, в том числе предельные деформационные возможности, при пластическом деформировании в большинстве случаев используются или экспериментальный подход, или компьютерное моделирование процесса методом конечных элементов. При этом теоретические исследования данного процесса, основанные на положениях и соотношениях механики деформируемого твёрдого тела, теории пластичности, теории обработки металлов давлением, практически отсутствуют. Очевидно, что это связано с особенностью процесса ИФ – отсутствием деформирующего инструмента, форма которого определяет конечную геометрию изделия.

### Обзор способов инкрементального формообразования

Инкрементальное формообразование – процесс обработки листового материала давлением, в котором заготовка локально деформируется путём перемещения по заданной траектории пуансона, размеры которого намного меньше размеров изделия (рис. 1, 2) [1]. Торец пуансона наиболее часто бывает полусферическим, шарикообразным и плоским [2 – 4]. Обычно диаметр пуансона составляет от 5 до 15 мм [5].

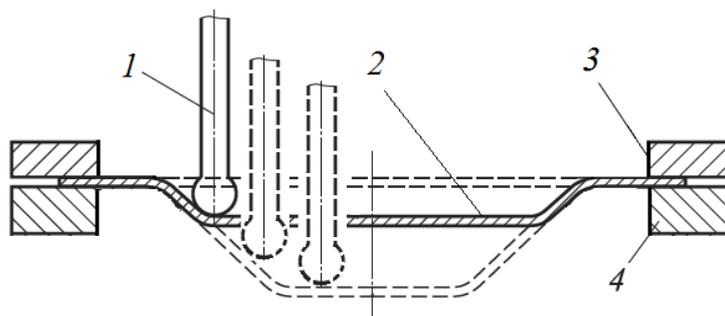


Рис. 1. Принципиальная схема инкрементального формообразования:  
1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – прижим; 4 – опорная плита

Таким образом, ИФ является дальнейшим развитием технологии ротационной вытяжки [6]. Характерной особенностью обоих процессов является локальный очаг деформации. Однако ротационной вытяжкой изготавливают только тела вращения, при этом всегда используется оправка, по которой производят обкатку. Технология ИФ не имеет данных ограничений.

Существует несколько вариантов траектории движения пуансона, наибольшее распространение из которых получили движение по винтовой линии с криволинейной образующей и послойное движение (рис. 2). Преимущество движения по винтовой линии в том, что на внутренней поверхности детали не остается дефекта в виде линии от перемещения пуансона между шагами, как при послойном движении пуансона. Размер шага деформирования – осевого и/или радиального расстояния между соседними витками – варьируется от 0,1 до 1 мм в зависимости от диаметра пуансона и толщины заготовки [7].

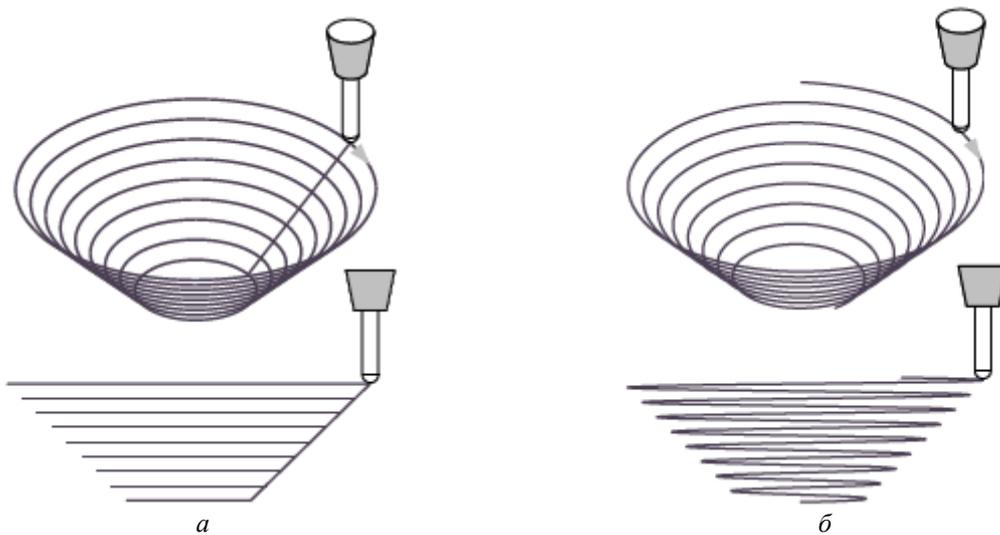


Рис. 2. Траектории движения деформирующего инструмента:  
а – послойно; б – по винтовой линии [8]

Усилие процесса ИФ зависит от толщины и свойств материала заготовки, коэффициента трения между заготовкой и пуансоном, диаметра пуансона и шага траектории движения пуансона. Так, при ИФ листов из алюминиевых сплавов, предел текучести которых от 35 до 241 МПа, толщиной от 0,8 до 2 мм, относительное усилие составляет 110...600 МПа [8].

Для повышения точности получаемых изделий и расширения технологических возможностей используют различные схемы ИФ (рис. 3, 4) [9]. Формообразование по схеме, приведённой на рис. 1, когда периферийная часть заготовки (фланец) не деформируется непосредственно пуансоном, является нерациональным при значительных степенях деформации, так как возникающие при этом изгибающие моменты приводят к прогибу незафиксированной периферийной части и к снижению точности изделия. Для устранения данного недостатка используются различные схемы (рис. 3, а – г), которые повышают жёсткость конструкции, уменьшают изгибающие моменты, но требуют дополнительной оснастки.

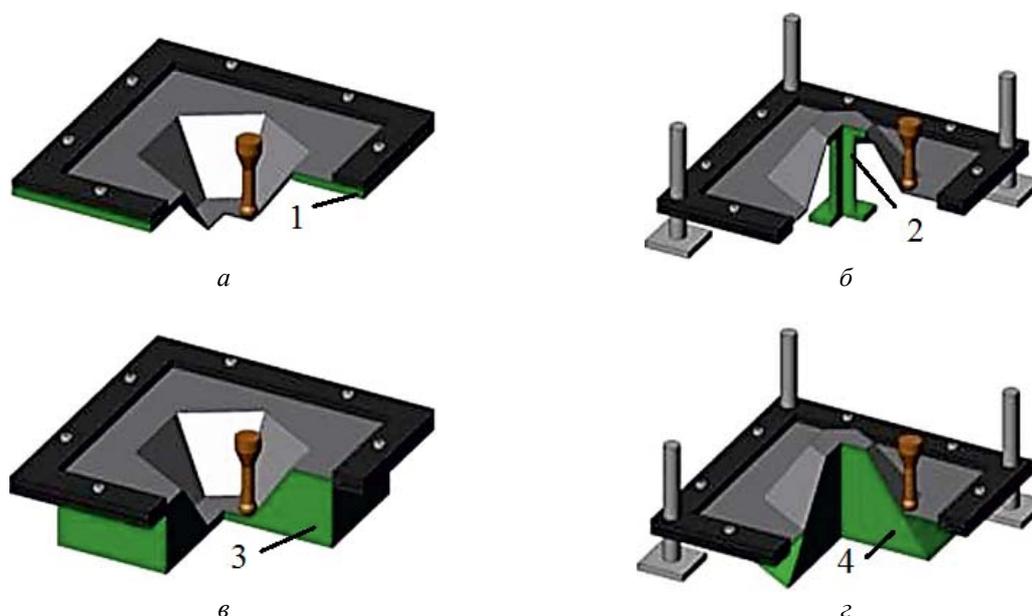


Рис. 3. Схемы инкрементального формообразования с периферийной (а) и локальной (б) поддержкой, с матрицей, повторяющей геометрию изделия (в-г) [7]:  
1 – опорная матрица; 2 – локальный упор; 3, 4 – матрица

Наиболее универсальной является схема, представленная на рис. 4, которая сочетает преимущества приведённых выше схем, но при этом необходим только контр-пуансон 2, перемещающийся синхронно с основным пуансоном 1. При этом встречаются два подхода к использованию контр-пуансона [10]. В первом случае контр-пуансон движется синхронно с пуансоном, не выходя за пределы фланца формируемого изделия (рис. 4, а), т.е. фактически выполняя роль опорной матрицы (рис. 3, а). Во втором случае перемещение контр-пуансона отстаёт ровно на один шаг (виток) от пуансона, обеспечивая локальную поддержку стенки изделия (рис. 4, б). Схема с применением двух деформирующих инструментов называется двухсторонним инкрементальным формообразованием (ДИФ). ДИФ позволяет снизить влияние изгибающего момента, а значит появляется возможность получения изделия сложных (выпукло-вогнутых) форм, в том числе и с поднутрениями.

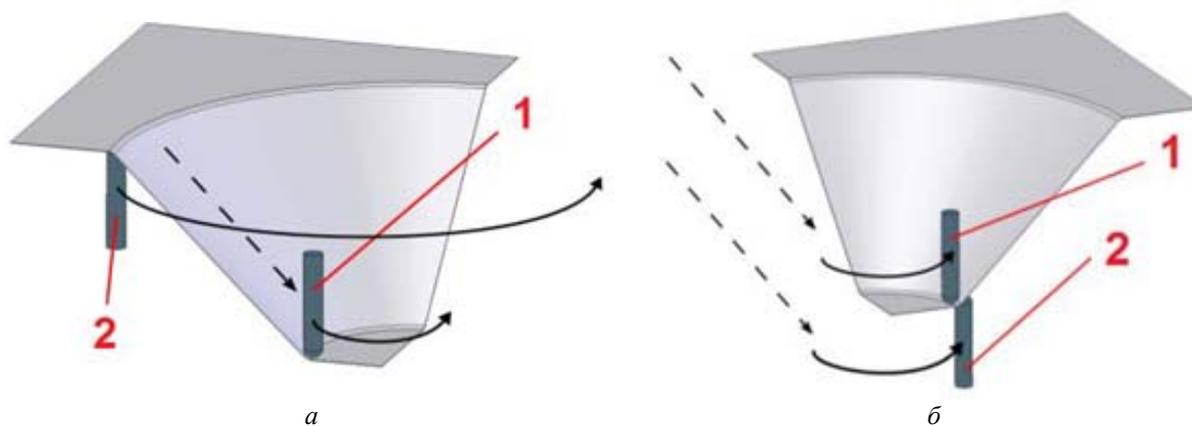


Рис. 4. Двухстороннее инкрементальное формообразование с периферийной (а) и локальной (б) поддержкой:  
1 – пуансон, 2 – контр-пуансон

## Оборудование для инкрементального формообразования

Для реализации процесса ИФ применяется следующее оборудование: трёх- и многокоординатные фрезерные станки с ЧПУ, промышленные роботы-манипуляторы и специализированные установки [8].

Так как помимо выбранной схемы ИФ на точность изделия оказывает влияние и жёсткость используемого оборудования, то при прочих равных условиях наивысшую точность обеспечивают фрезерные станки, имеющие жёсткость около 200 кН/мм (жёсткость роботов-манипуляторов редко достигает 120 кН/мм) [11 – 12]. Несмотря на это, промышленные роботы-манипуляторы используются чаще, чем фрезерные станки, особенно в исследовательских целях [13 – 17]. Это связано с тем, что шесть осей свободы робота-манипулятора позволяют позиционировать инструмент под разными углами к поверхности листа, а значит – позволяют более гибко подходить к разработке траектории перемещения деформирующего инструмента. Кроме того, роботы-манипуляторы имеют большую рабочую зону и скорость перемещения. Основным недостатком является уменьшение точности позиционирования с увеличением грузоподъёмности и рабочей зоны робота, что ограничивает возможности применения роботов-манипуляторов для ИФ заготовок большой толщины (от 4 мм) и/или высокопрочных сплавов [18].

Для реализации некоторых из приведённых выше схем ИФ, для которых стандартные фрезерные станки и роботы-манипуляторы не подходят, разработаны специализированные установки [19]. Первый вариант такой установки для ИФ был описан в патенте [20]. В большинстве случаев такие установки предназначены для формообразования изделий заданных типоразмеров и формы, что значительно снижает их универсальность и гибкость к переналадке для выпуска новых изделий, например установка с двумя деформирующими инструментами, но с тремя степенями свободы [21]. Наиболее значительных результатов в области создания специализированных установок для ИФ достигла компания Ford и Northwestern University, которые разработали установку для ДИФ на основе двух гексоподов (платформ Стюарта) [22]. Компанией Ford была разработана система управления данной установкой, обеспечивающая синхронное перемещение деформирующих инструментов, а в Northwestern University была спроектирована система локального нагрева заготовки путём пропускания тока через заготовку между двумя пуансонами для повышения пластичности материала [23].

Разработкой специальных установок для ИФ занимаются и другие исследовательские группы из разных стран (Англия, Португалия, Япония, США) [3; 24-26]. Направления их деятельности связаны с совершенствованием различных аспектов ИФ. Так, учёные из Кембриджа [25] разработали систему для быстрой смены инструмента при ИФ; учёными из Авейру [3] проведена адаптация платформы Стюарта под задачи ИФ. В работе [27] спроектировано устройство для ИФ, состоящее из С-образной рамы, установленной на шпиндельном седле станка с ЧПУ. Пуансон и контр-пуансон в данном случае установлены на верхней и нижней опорах С-образной рамы. Недостатком данного механизма является то, что С-образная рама ограничивает рабочее пространство, кроме того, уменьшается точность при увеличении усилия формообразования.

Подробный обзор различных установок для ИФ приведён в работе [12].

## Исследования механизма деформации при инкрементальном формообразовании

Главной особенностью ИФ, теоретическому и экспериментальному исследованию которой посвящены многие работы, является увеличение предельных деформационных возможностей материала по сравнению с обычными процессами листовой штамповки [28 – 29]. Известно, что в значительной степени предельные деформации материала,

достижимые при обработке металлов давлением, определяются напряжённо-деформированным состоянием [30 – 31], поэтому основным направлением исследований ИФ является изучение напряжений и деформаций. Так, в работе [32] сделан вывод о том, что во время процесса ИФ преобладают деформации растяжения. В работе [33] доказано, что при ИФ наблюдается растяжение и сдвиг в плоскости, перпендикулярной направлению движения инструмента, а также сдвиг в плоскости, параллельной направлению движения инструмента. В работах [34 – 35] установлено, что деформация при ИФ является комбинацией растяжения, изгиба и сдвига.

Предложено несколько механизмов ИФ, объясняющих увеличение предельных деформаций. В работах [36 – 37], анализируя процесс ИФ методом конечных элементов, сделан вывод, что основной причиной увеличения деформационных возможностей являются сдвиговые деформации по толщине листа. Это предположение развито в работах [38 – 40], где детально проанализировано влияние деформации сдвига по толщине на предельные деформационные возможности при ИФ. Эти работы позволили на основе модели Марциниака-Кучински спрогнозировать начало сосредоточенной деформации при наличии деформации сдвига по толщине [41 – 42]. В результате установлено, что на деформационные возможности материала большое влияние оказывает деформация сдвига по толщине. Хотя в работе [43], наоборот, показано, что сдвиг по толщине не влияет на предельную деформацию при ИФ.

В работе [44] на основе испытания на изгиб с растяжением сделано предположение, что основным фактором для увеличения деформационных возможностей при ИФ является изгиб. В работе [45] предложена теоретическая модель, согласно которой разрушение при ИФ вызвано меридиональными растягивающими напряжениями, а не касательными напряжениями в плоскости. Однако при построении этой модели не учитывалось деформационное упрочнение и анизотропия, а изгибающие напряжения были включены в анализ косвенно. Используя те же допущения, в работе [46] проанализирован процесс ИФ на основе теории тонких оболочек. В результате получены диаграммы предельных деформаций для момента начала разрушения, а не начала сосредоточенной деформации как для традиционных диаграмм предельных деформаций.

В целом обычные диаграммы предельных деформаций не подходят для ИФ, так как не учитывают особенностей процесса, в частности, значительно более позднее начало сосредоточенной деформации [47]. Поэтому в работе [48] предложено использовать в качестве критерия разрушения при ИФ уменьшение площади поперечного сечения и на основании этого подхода эмпирически рассчитаны предельные деформации. Также для экспериментальной оценки предельных деформаций материала при ИФ предложено использовать максимальный угол между образующей и осью симметрии конической детали, который может быть получен без возникновения разрывов [49]. Этот предельный угол зависит от марки материала, толщины листа и таких параметров процесса как радиус пуансона, величина шага перемещения пуансона, скорость подачи, температура и т.д. [3]. Обычно для определения этого угла используются два типа деталей: детали с постоянным углом образующей, например конус, или детали с переменным углом. Однако для последней предельный угол будет зависеть от конечной геометрии детали и может превышать результаты, полученные на деталях с постоянным углом образующей, на  $4^\circ$  [50 – 51].

Еще одним параметром для оценки предельных деформаций материала при ИФ является усилие процесса, контролируя которое можно прогнозировать момент разрушения заготовки [52]. Это позволяет предотвратить разрушение, изменяя параметры процесса (диаметр инструмента, величина шага) при значительном росте усилия. Это возможно, так как осевое усилие пропорционально величине шага и диаметру инструмента [53]. Однако хотя данный подход и применим для конических деталей, он не

подходит для пирамидальных [54]. Это связано с тем, что рёбра пирамиды действуют как рёбра жёсткости и сдерживают увеличение усилия, происходящее непосредственно перед разрушением.

В работе [39] обобщено влияние нормального напряжения по толщине и циклического нагружения на локализацию деформации, устойчивость и высокие деформационные возможности материала в процессе ИФ. В работах [37; 55] с целью объяснения механизма повышения предельных деформаций при ИФ рассмотрены различные факторы: нормальное напряжение (по толщине листа); изгиб с растяжением; сдвиг (как по толщине, так и в плоскости листа); циклическое нагружение; малые размеры очага пластической деформации и гидростатическое напряжение. Установлено, что первые три фактора приводят к локализации деформации при ИФ; все факторы, кроме последнего, сдерживают процесс сосредоточенной деформации.

В целом доминирующий механизм деформации зависит от конкретных условий процесса ИФ [32]. Например, в работе [56] показано, что с уменьшением диаметра пуансона происходит увеличение предельных деформационных возможностей материала. В некоторых случаях механизм деформации при ИФ определяется не только геометрией детали и режимом деформирования, но и маркой материала. Так, для некоторых материалов в процессе деформирования происходит постепенное утонение вплоть до разрушения, в то время как для других материалов разрушение происходит раньше [57]. В таких случаях применима модифицированная модель Гурсона-Твергаарда-Нидлмана [58], которая может быть использована для прогнозирования вязкого разрушения при инкрементальной штамповке.

Таким образом, хотя в вышеупомянутых теоретических и экспериментальных исследованиях и сделана попытка объяснить повышенные деформационные возможности материала при ИФ, однозначное понимание механизма деформации и факторов, приводящих к разрушению, все ещё отсутствует [30; 59]. Более того, стандартные модели материалов и конечных элементов, доступные в программах для расчётов методом конечных элементов, не позволяют учесть всех особенностей процесса ИФ.

### **Численное моделирование инкрементального формообразования**

В научных публикациях, посвящённых моделированию [60 – 66] процесса ИФ методом конечных элементов, в основном рассматриваются изделия простой геометрической формы, такие как пирамиды, в том числе усечённые, тела вращения, например, полусферы, конусы и тому подобное. При этом траектории перемещения деформирующего инструмента, описывающие перечисленные геометрические формы, задаются достаточно простыми математическими уравнениями, например уравнением винтовой линии. Моделирование процесса ИФ таких изделий упрощённой формы позволяет изучить особенности процесса, но не применимо для выбора оптимальных технологических параметров формообразования конкретных изделий сложной геометрии. В этом случае траекторию движения деформирующего инструмента практически невозможно описать математически, поэтому используются специализированные САМ-системы, которые могут создавать очень сложные траектории. Данные траектории фактически являются списком пространственных координат, через которые должен последовательно пройти пуансон. Эта последовательность координат представляется в соответствии со стандартом, который определяется используемым оборудованием, например KRL или G-Code. Такой метод представления траектории позволяет использовать все возможности оборудования, а также учитывать его пространственные ограничения и даже описывать движения вперёд и назад, зигзаги и любые другие асимметричные движения, которые не могут быть представлены в виде небольшого и простого набора математических уравнений. Такой подход к заданию траектории является удобным и при

описании простых геометрических форм, когда ИФ происходит послойно, а не по винтовой линии (см. рис. 2).

Сложность применения описанного подхода связана с невозможностью непосредственного экспорта траекторий движения деформирующего инструмента, созданных в САМ-системе, в программу для конечно-элементного моделирования. Хотя в большинстве таких программ возможно задание перемещения по точкам, воспользоваться данной функцией невозможно из-за большого количества последовательных координат, рассчитываемых САМ-системой. Уменьшение же количества точек приводит к снижению точности.

Таким образом, в настоящее время из-за отсутствия решения указанной проблемы продолжается использование траекторий, которые легко описать математически. Это значительно ограничивает развитие теории и технологии ИФ, так как, как уже было сказано, современное оборудование позволяет задавать перемещение деформирующего инструмента в шести координатах. Таким образом, при численном моделировании ИФ закладывается ограничение, которое не имеет применяемое оборудование, тогда как противоположное было бы предпочтительнее. То есть исследования должны опережать в развитии существующее оборудование, стимулируя их эволюцию.

Первые попытки решения указанной проблемы предложены в работах [67-68], в которых используются предварительно сконфигурированные электронные таблицы для извлечения значений координат из файлов, созданных в САМ-системах. Такое извлечение возможно благодаря тому, что такие файлы в большинстве случаев имеют открытый код. После извлечения полученные координаты могут быть перенесены в систему для конечно-элементного моделирования (LS-DYNA, Abaqus или любую другую). В работах [67 – 68] в дополнение к извлечению значений координат траектории инструмента также осуществляется обработка данных, связанная с заданием скорости инструмента, с учётом расстояния между последовательными точками и общей длины траектории, чтобы адаптировать интервалы и сократить время моделирования. Недостатком отмеченных работ является то, что они добавляют ещё один шаг к процессу исследования, предполагают использование дополнительных программ. Таким образом, окончательного решения, которое дало бы необходимую свободу исследователям при проведении моделирования процесса ИФ и для изучения более сложных траекторий на основе тех же данных, которые управляют промышленным оборудованием, всё ещё не предложено.

Авторами предложено альтернативное решение указанной проблемы. В отличие от работ, упомянутых выше, настоящее решение не добавляет дополнительных этапов в исследовательский процесс и не требует использования дополнительного программного обеспечения. Разработанный алгоритм способен считывать файл \*.src, создаваемый системой SprutCAM [69], и интерпретировать используемые в нём команды LIN, CIRC и VEL для извлечения необходимой информации (значений координат и скорости). При необходимости применяется метод дискретизации частей траектории. Таким образом, производится реконструкция дискретизированной траектории в программе LS-PrePost, эквивалентной исходной траектории, разработанной в САМ-системе. Алгоритм в виде плагина был интегрирован непосредственно в пре- и постпроцессор программы для конечно-элементного моделирования LS-Dyna – LS-PrePost. Алгоритм написан на языке пре- и постпроцессора LS-PrePost. Решение протестировано и успешно используется, что подтверждено полученным охранным документом на программу [70].

Разработанная программа была использована для исследования и разработки процесса ИФ персонифицированного имплантата кости свода черепа. На рис. 5, а показана траектория движения деформирующего инструмента, разработанная в программе

SprutCAM; на рис. 5, б показана траектория движения деформирующего инструмента в программе LS-PrePost, созданная с использованием разработанного алгоритма.

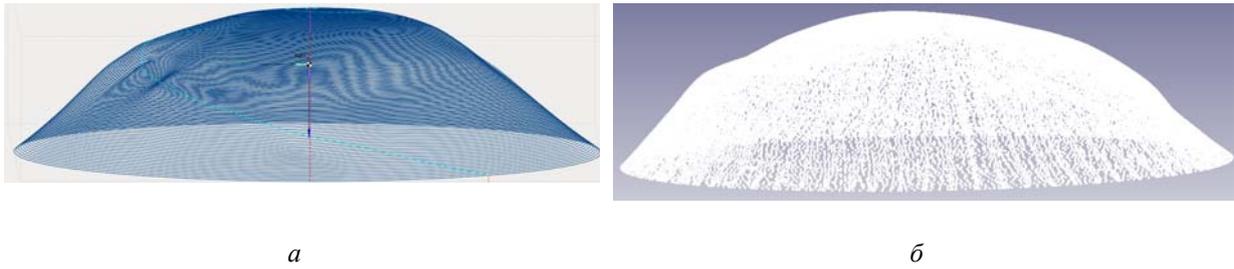


Рис. 5. Траектории движения деформирующего инструмента в программе SprutCAM (а) и в программе LS-PrePost (б)

На рис. 6 показаны результаты конечно-элементного моделирования процесса ИФ имплантата и изготовленное изделие. Как видно из рис. 6, геометрия изделия, полученного при моделировании с использованием разработанного алгоритма переноса траектории, совпадает с геометрией изделия, полученного в ходе эксперимента.

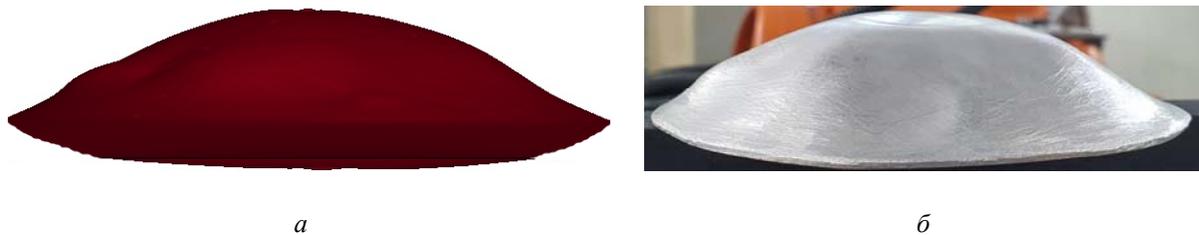


Рис. 6. Результаты моделирования (а) и физическая модель изделия (б)

### Заключение

Использование технологии ИФ в отличие от способов листовой штамповки позволяет значительно уменьшить количество переходов при производстве изделий сложной формы за счёт повышения предельных деформационных возможностей заготовки, а также сократить время, требуемое для проектирования и производства оснастки. Применение технологии ИФ возможно и для быстрого прототипирования изделий, например, для их последующего испытания. Для исследования и разработки технологии ИФ широко используется конечно-элементное моделирование. Однако на данный момент отсутствует готовое решение для моделирования процесса ИФ изделий сложной формы, когда используются траектории на основе данных, которые управляют промышленным оборудованием. Описано разработанное авторами решение для экспорта траектории движения деформирующего инструмента при ИФ из САМ (SprutCAM) в САЕ (LS-Dyna) систему. Настоящее решение не добавляет этапов в исследовательский процесс и не предполагает использования дополнительного программного обеспечения.

Исследование выполнено в рамках госзадания (тема FSSS-2020-0016).

### **Библиографический список**

1. Кривошеин В.А., Анцифиров А.А., Майстров Ю.В. Перспективы использования технологий инкрементальной формовки в современном производстве // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 11 (656). С. 84-89.
2. Ziran X., Gao L., Hussain G., Cui Z. The performance of flat end and hemispherical end tools in single-point incremental forming // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010. V. 46, Iss. 9-12. P. 1113-1118. DOI: 10.1007/s00170-009-2179-4
3. Verbert J. Computer aided process planning for rapid prototyping with incremental sheet forming techniques. PhD Thesis. Katholieke Universiteit Leuven, 2010.
4. Jeswiet J., Adams D., Doolan M., McAnulty T., Gupta P. Single point and asymmetric incremental forming // Advances in Manufacturing. 2015. V. 3, Iss. 4. P. 253-262. DOI: 10.1007/s40436-015-0126-1
5. Callebaut B., Duflou J., Verbert J. Asymmetric incremental sheet forming system. US Patent US20090158805A1, 2011. (Publ. 26.07.2011)
6. Юдин Л.Г., Яковлев С.П. Ротационная вытяжка цилиндрических оболочек. М.: Машиностроение, 1984. 128 с.
7. Behera A.K., de Sousa R.A., Ingarao G., Oleksik V. Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015 // Journal of Manufacturing Processes. 2017. V. 27. P. 37-62. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.03.014
8. Marabuto S.R., Afonso D., Ferreira J.A.F., Melo F.Q., Martins M., de Sousa R.J. Finding the best machine for SPIF operations. A brief discussion // Key Engineering Materials. 2011. V. 473. P. 861-868. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.473.861
9. Allwood J.M., Braun D., Music O. The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming // Journal of Materials Processing Technology. 2010. V. 210, Iss. 11. P. 1501-1510. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.04.008
10. Tisza M., Paniti I., Kovács P.Z. Experimental and numerical study of a milling machine-based dieless incremental sheet forming // Journal of Material Forming. 2010. V. 3, Iss. 1. P. 971-974. DOI: 10.1007/s12289-010-0931-9
11. Verbert J., Aerens R., Vanhove H., Aertbeliën E., Duflou J.R. Obtainable accuracies and compensation strategies for robot supported SPIF // Key Engineering Materials. 2009. V. 410-411. P. 679-687. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.410-411.679
12. Portman V.T. Stiffness evaluation of machines and robots: minimum collinear stiffness value approach // Journal of Mechanisms and Robotics. 2011. V. 3, Iss. 1. DOI: 10.1115/1.4003444
13. Schafer T., Schraft R.D. Incremental sheet metal forming by industrial robots // Rapid Prototyping Journal. 2005. V. 11, Iss. 5. P. 278-286. DOI: 10.1108/13552540510623585
14. Duflou J.R., Callebaut B., Verbert J., De Baerdemaeker H. Laser assisted incremental forming: Formability and accuracy improvement // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2007. V. 56, Iss. 1. P. 273-276. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.05.063
15. Meier H., Dewald O., Zhang J. A new robot-based sheet metal forming process // Advanced Materials Research. 2005. V. 6-8. P. 465-470. DOI: 10.4028/0-87849-972-5.465
16. Lamminen L. Incremental sheet forming with an industrial robot – forming limits and their effect on component design // Advanced Materials Research. 2005. V. 6-8. P. 457-464. DOI: 10.4028/0-87849-972-5.457
17. Callegari M., Amodio D., Ceretti E., Giardini C. Sheet incremental forming: advantages of robotized cells vs. CNC machines // Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications. 2007. P. 493-514.

18. Jeswiet J., Micari F., Hirt G., Bramley A., Duflou J., Allwood J. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2005. V. 54, Iss. 2. P. 88-114. DOI: 10.1016/s0007-8506(07)60021-3
19. Emmens W.C., Sebastiani G., van den Boogaard A.H. The technology of Incremental Sheet Forming – a brief review of the history // *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. V. 210, Iss. 8. P. 981-997. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.02.014
20. Matsubara S. Method and device for forming metal plate. Japanese Patent JPH07132329A, 2002. (Publ. 17.06.2002)
21. Gutierrez P.R., Rastrero M., Onandia E. Maschine zum formen von blech und formverfahren. EU Patent EP1977842A1, 2008. (Publ. 08.10.2008)
22. Johnson C.F., Vijitha S.K., Feng R., Zhiyong C.X. System and method for incrementally forming a workpiece. US Patent US8322176B2, 2012. (Publ. 04.12.2012)
23. Cao J., Xia Z.C., Gutowski T.G., Roth J. A hybrid forming system: Electrical-assisted double side incremental forming (EADSIF) process for enhanced formability and geometrical flexibility. Technical Report no. DE-EE0003460. Northwestern University, 2012.
24. Allwood J., Houghton N., Jackson K. The design of an incremental sheet forming machine // *Advanced Materials Research*. 2005. V. 6-8. P. 471-478. DOI: 10.4028/0-87849-972-5.471
25. Okada N., Ro G., Suzuki Y. Method and apparatus for incremental forming. US Patent US20040187545A1, 2005. (Publ. 06.12.2005)
26. Shima A., Yoshikawa T., Nakamura K., Sudo Y., Suzuki Sh. Formation of successively expanding metallic plate and apparatus therefor. 1997. Japanese Patent JP09-085355.
27. Wang Y., Huang Y., Cao J., Reddy N.V. Experimental study on a new method of double side incremental forming // *Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference (October, 7-10, 2008, Evanston, USA)*. 2009. V. 1. P. 601-607. DOI: 10.1115/MSEC\_ICMP2008-72279
28. Shim M.-S., Park J.-J. The formability of aluminum sheet in incremental forming // *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. V. 113, Iss. 1-3. P. 654-658. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00679-3
29. Park J.-J., Kim Y.-H. Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. V. 140, Iss. 1-3. P. 447-453. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00768-4
30. Томленов А.М. Теория пластического деформирования металлов. М.: Металлургия, 1972. 408 с.
31. Колмогоров В.Л., Богатов А.А., Мигачев Б.А., Зудов Е.Г., Фрейдензон Ю.Е., Фрейдензон М.Е. Пластичность и разрушение. М.: Металлургия, 1977. 336 с.
32. Filice L., Fratini L., Micari F. Analysis of material formability in incremental forming // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2002. V. 51, Iss. 1. P. 199-202. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61499-1
33. Jackson K., Allwood J. The mechanics of incremental sheet forming // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. V. 209, Iss. 3. P. 1158-1174. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.025
34. Malhotra R., Xue L., Belytschko T., Cao J. Mechanics of fracture in single point incremental forming // *Journal of Materials Processing Technology*. 2012. V. 212, Iss. 7. P. 1573-1590. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.021
35. Young D., Jeswiet J. Wall thickness variations in single-point incremental forming // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2004. V. 218, Iss. 11. P. 1453-1459. DOI: 10.1243/0954405042418400

36. Kim T.J., Yang D.Y. Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2000. V. 42, Iss. 7. P. 1271-1286. DOI: 10.1016/S0020-7403(99)00047-8
37. Emmens W.C., van den Boogaard A.H. An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. V. 209, Iss. 8. P. 3688-3695. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.10.003
38. Eyckens P., Belkassam B., Henrard C., Gu J., Sol H., Habraken A.M., Duflou J.R., van Bael A., van Houtte P. Strain evolution in the single point incremental forming process: digital image correlation measurement and finite element prediction // *International Journal of Material Forming*. 2011. V. 4, Iss. 1. P. 55-71. DOI: 10.1007/s12289-010-0995-6
39. Eyckens P., Van Bael A., Van Houtte P. An extended Marciniak–Kuczynski model for anisotropic sheet subjected to monotonic strain paths with through-thickness shear // *International Journal of Plasticity*. 2011. V. 27, Iss. 10. P. 1577-1597. DOI: 10.1016/j.ijplas.2011.03.008
40. Eyckens P., He S., Van Bael A., Van Houtte P., Duflou J. Forming limit predictions for the serrated strain paths in single point incremental sheet forming // *AIP Conference Proceedings*. 2007. V. 908. P. 141-146. DOI: 10.1063/1.2740802
41. Eyckens P., Moreau J.D.-I., Duflou J.R., Van Bael A., Van Houtte P. MK modelling of sheet formability in the incremental sheet forming process, taking into account through-thickness shear // *International Journal of Material Forming*. 2009. V. 2, Iss. 1. P. 379-382. DOI: 10.1007/s12289-009-0458-0
42. Eyckens P., Van Bael A., Aerens R., Duflou J., Van Houtte P. Small-scale finite element modelling of the plastic deformation zone in the incremental forming process // *International Journal of Material Forming*. 2008. V. 1. P. 1159-1162. DOI: 10.1007/s12289-008-0186-x
43. Allwood J.M., Shouler D.R. Generalised forming limit diagrams showing increased forming limits with non-planar stress states // *International Journal of Plasticity*. 2009. V. 25, Iss. 7. P. 1207-1230. DOI: 10.1016/j.ijplas.2008.11.001
44. Emmens W.C., van den Boogaard A.H. Incremental forming by continuous bending under tension – An experimental investigation // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. V. 209, Iss. 14. P. 5456-5463. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.04.023
45. Silva M.B., Skjoedt M., Martins P.A.F., Bay N. Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008. V. 48, Iss. 1. P. 73-83. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.07.004
46. Martins P.A.F., Bay N., Skjoedt M., Silva M.B. Theory of single point incremental forming // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2008. V. 57, Iss. 1. P. 247-252. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.047
47. Eyckens P. Formability in incremental sheet forming: generalization of the marciniak-kuczynski model. PhD Thesis. Katholieke Universiteit Leuven, 2010.
48. Hussain G., Gao L., Hayat N., Ziran Xu. A new formability indicator in single point incremental forming // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. V. 209, Iss. 9. P. 4237-4242. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.11.024
49. Jeswiet J., Young D. Forming limit diagrams for single-point incremental forming of aluminium sheet // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2005. V. 219, Iss. 4. P. 359-364. DOI: 10.1243/095440505X32210
50. Hussain G., Gao L., Hayat N., Qijian L. The effect of variation in the curvature of part on the formability in incremental forming: An experimental investigation // *International*

Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007. V. 47, Iss. 14. P. 2177-2181. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2007.05.001

51. Behera A.K. Shape feature taxonomy development for toolpath optimisation in incremental sheet forming. PhD Thesis. Katholieke Universiteit Leuven, 2013.

52. Filice L., Ambrogio G., Micari F. On-line control of single point incremental forming operations through punch force monitoring // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2006. V. 55, Iss. 1. P. 245-248. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60408-9

53. Aereens R., Eyckens P., Van Bael A., Duflou J. Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010. V. 46, Iss. 9-12. P. 969-982. DOI: 10.1007/s00170-009-2160-2

54. Szekeres A., Ham M., Jeswiet J. Force measurement in pyramid shaped parts with a spindle mounted force sensor // Key Engineering Materials. 2007. V. 344. P. 551-558. DOI: 10.4028/0-87849-437-5.551

55. Emmens W.C., Van den Boogaard A.H. Strain in shear, and material behaviour in incremental forming // Key Engineering Materials. 2007. V. 344. P. 519-526. DOI: 10.4028/0-87849-437-5.519

56. Centeno G., Bagudanch I., Martínez-Donaire A.J., Garcia-Romeu M.L., Vallellano C. Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming // Materials and Design. 2014. V. 63. P. 20-29. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.05.066

57. Lu B., Fang Y., Xu D.K., Chen J., Ai S., Long H., Ou H., Cao J. Investigation of material deformation mechanism in double side incremental sheet forming // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2015. V. 93. P. 37-48. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2015.03.007

58. Gatea S., Lu B., Ou H., McCartney G. Numerical simulation and experimental investigation of ductile fracture in SPIF using modified GTN model // MATEC Web of Conferences. 2015. V. 21. DOI: 10.1051/mateconf/20152104013

59. Silva M.B., Nielsen P.S., Bay N., Martins P.A.F. Failure mechanisms in single-point incremental forming of metals // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. V. 56, Iss. 9-12. P. 893-903. DOI: 10.1007/s00170-011-3254-1

60. Fu Z., Mo J., Chen L., Chen W. Using genetic algorithm-back propagation neural network prediction and finite-element model simulation to optimize the process of multiple-step incremental air-bending forming of sheet metal // Materials and Design. 2010. V. 31, Iss. 1. P. 267-277. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.06.019

61. Yamashita M., Gotoh M., Atsumi S.-Y. Numerical simulation of incremental forming of sheet metal // Journal of Materials Processing Technology. 2008. V. 199, Iss. 1-3. P. 163-172. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.07.037

62. Ambrogio G., Costantino I., De Napoli L., Filice L., Fratini L., Muzzupappa M. Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: a numerical and experimental investigation // Journal of Materials Processing Technology. 2004. V. 153-154, Iss. 1-3. P. 501-507. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.139

63. Bambach M., Hirt G., Ames J. Quantitative validation of FEM simulations for incremental sheet forming using optical deformation measurement // Advanced Materials Research. 2005. V. 6-8. P. 509-516. DOI: 10.4028/0-87849-972-5.509

64. Henrard C., Habraken A.M., Szekeres A., Duflou J.R., He S., Van Bael A., Van Houtte P. Comparison of FEM simulations for the incremental forming process // Advanced Materials Research. 2005. V. 6-8. P. 533-540. DOI: 10.4028/0-87849-972-5.533

65. Hirt G., Ames J., Bambach M. Validation of FEA for asymmetric incremental sheet forming by on-line measurements of deformation and tool forces // *Production Engineering*. 2006. V. 13, Iss. 1. P. 39-44.

66. Zettler J., Rezai H., Taleb-Araghi B., Bambach M., Hirt G. Incremental sheet forming – process simulation with LS-DYNA // 6th German LS-DYNA forum (October, 11-12, 2007, Frankenthal, Germany).

67. Yeshiwas Z., Krishnaiah A. Extraction of coordinate points for the numerical simulation of single point incremental forming using Microsoft Excel // *International Conference on Emerging Trends in Engineering (ICETE)* (March, 22-23, 2019, India). 2020. V. 2. DOI: 10.1007/978-3-030-24314-2\_69

68. Xu G.-L., Jarosz A., Saavedra-Rosas J. Extending dynamic mining subsidence models // *Proceedings of International Academic Forum in China* (June, 18-19, 2011, Jiaozuo, China). P. 5-10.

69. Конов Н. Программирование промышленных роботов в SprutCAM // *САПР и графика*. 2016. № 5 (235). С. 18-21.

70. Де Алваренга Р., Гречников Ф.В., Ерисов Я.А., Сурудин С.В., Петров И.Н. Программа для экспорта траектории движения деформирующего инструмента из САМ в САЕ систему: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663935, опубли. 05.11.2020.

## STATE OF THE ART OF THEORY AND TECHNOLOGY OF INCREMENTAL FORMING

© 2021

- F. V. Grechnikov** Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Metal Forming; Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
Chief Researcher;  
Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russian Federation;  
[gretch@ssau.ru](mailto:gretch@ssau.ru)
- S. V. Surudin** Candidate of Science (Engineering), Senior Researcher of the Research Laboratory of Plastic Working of Special Materials; Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
Senior Researcher;  
Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russian Federation;  
[innosam63@gmail.com](mailto:innosam63@gmail.com)
- Ya. A. Erisov** Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Metal Forming; Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
Senior Researcher;  
Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russian Federation;  
[yaroslav.erisov@mail.ru](mailto:yaroslav.erisov@mail.ru)
- R. De Alvarenga** Research Fellow of the Research Laboratory of Plastic Working of Special Materials; Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[vasia.razzhivin@yandex.ru](mailto:vasia.razzhivin@yandex.ru)

On the basis of the literature review carried out, the article assesses the current state and development trends of the theory and technology of incremental forming – a promising technological process for rapid prototyping of parts from sheet blanks. The basics of the process and the equipment for its implementation, the mechanism of deformation during incremental forming are described. The developed solution for exporting the trajectory of the deforming tool from the CAM to the CAE system is described.

*Incremental forming; deformed state; ultimate deformations; equipment; methods; modeling*

*Citation:* Grechnikov F.V., Surudin S.V., Erisov Ya.A., De Alvarenga R. State of the art of theory and technology of incremental forming. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 3. P. 119-137. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-119-137

## References

1. Krivoshein V.A., Antsifirov A.A., Maistrov Yu.V. Prospects of the incremental forming technology in modern manufacturing. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 2014. No. 11 (656). P. 84-89. (In Russ.)
2. Ziran X., Gao L., Hussain G., Cui Z. The performance of flat end and hemispherical end tools in single-point incremental forming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010. V. 46, Iss. 9-12. P. 1113-1118. DOI: 10.1007/s00170-009-2179-4
3. Verbert J. Computer aided process planning for rapid prototyping with incremental sheet forming techniques. PhD Thesis. Katholieke Universiteit Leuven, 2010.
4. Jeswiet J., Adams D., Doolan M., McAnulty T., Gupta P. Single point and asymmetric incremental forming. *Advances in Manufacturing*. 2015. V. 3, Iss. 4. P. 253-262. DOI: 10.1007/s40436-015-0126-1
5. Callebaut B., Duflou J., Verbert J. Asymmetric incremental sheet forming system. US Patent US20090158805A1, 2011. (Publ. 26.07.2011)
6. Yudin L.G., Yakovlev S.P. *Rotatsionnaya vytyazhka tsilindricheskikh obolochek* [Rotary drawing of cylindrical shells]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1984. 128 p.
7. Behera A.K., de Sousa R.A., Ingarao G., Oleksik V. Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017. V. 27. P. 37-62. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.03.014
8. Marabuto S.R., Afonso D., Ferreira J.A.F., Melo F.Q., Martins M., de Sousa R.J. Finding the best machine for SPIF operations. A brief discussion. *Key Engineering Materials*. 2011. V. 473. P. 861-868. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.473.861
9. Allwood J.M., Braun D., Music O. The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. V. 210, Iss. 11. P. 1501-1510. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.04.008
10. Tisza M., Paniti I., Kovács P.Z. Experimental and numerical study of a milling machine-based dieless incremental sheet forming. *Journal of Material Forming*. 2010. V. 3, Iss. 1. P. 971-974. DOI: 10.1007/s12289-010-0931-9
11. Verbert J., Aerens R., Vanhove H., Aertbeliën E., Duflou J.R. Obtainable accuracies and compensation strategies for robot supported SPIF. *Key Engineering Materials*. 2009. V. 410-411. P. 679-687. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.410-411.679
12. Portman V.T. Stiffness evaluation of machines and robots: minimum collinear stiffness value approach. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2011. V. 3, Iss. 1. DOI: 10.1115/1.4003444
13. Schafer T., Schraft R.D. Incremental sheet metal forming by industrial robots. *Rapid Prototyping Journal*. 2005. V. 11, Iss. 5. P. 278-286. DOI: 10.1108/13552540510623585

14. Duflou J.R., Callebaut B., Verbert J., De Baerdemaeker H. Laser assisted incremental forming: Formability and accuracy improvement. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2007. V. 56, Iss. 1. P. 273-276. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.05.063
15. Meier H., Dewald O., Zhang J. A new robot-based sheet metal forming process. *Advanced Materials Research*. 2005. V. 6-8. P. 465-470. DOI: 10.4028/0-87849-972-5.465
16. Lamminen L. Incremental sheet forming with an industrial robot - forming limits and their effect on component design. *Advanced Materials Research*. 2005. V. 6-8. P. 457-464. DOI: 10.4028/0-87849-972-5.457
17. Callegari M., Amodio D., Ceretti E., Giardini C. Sheet incremental forming: advantages of robotised cells vs. CNC machines. *Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications*. 2007. P. 493-514.
18. Jeswiet J., Micari F., Hirt G., Bramley A., Duflou J., Allwood J. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2005. V. 54, Iss. 2. P. 88-114. DOI: 10.1016/s0007-8506(07)60021-3
19. Emmens W.C., Sebastiani G., van den Boogaard A.H. The technology of Incremental Sheet Forming - a brief review of the history. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. V. 210, Iss. 8. P. 981-997. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.02.014
20. Matsubara S. Method and device for forming metal plate. Japanese Patent JPH07132329A, 2002. (Publ. 17.06.2002)
21. Gutierrez P.R., Rastrero M., Onandia E. Maschine zum formen von blech und formverfahren. EU Patent EP1977842A1, 2008. (Publ. 08.10.2008)
22. Johnson C.F., Vijitha S.K., Feng R., Zhiyong C.X. System and method for incrementally forming a workpiece. US Patent US8322176B2, 2012. (Publ. 04.12.2012)
23. Cao J., Xia Z.C., Gutowski T.G., Roth J. A hybrid forming system: Electrical-assisted double side incremental forming (EADSIF) process for enhanced formability and geometrical flexibility. Technical Report no. DE-EE0003460. Northwestern University, 2012.
24. Allwood J., Houghton N., Jackson K. The design of an incremental sheet forming machine. *Advanced Materials Research*. 2005. V. 6-8. P. 471-478. DOI: 10.4028/0-87849-972-5.471
25. Okada N., Ro G., Suzuki Y. Method and apparatus for incremental forming. US Patent US20040187545A1, 2005. (Publ. 06.12.2005)
26. Shima A., Yoshikawa T., Nakamura K., Sudo Y., Suzuki Sh. Formation of successively expanding metallic plate and apparatus therefor. 1997. Japanese Patent JP09-085355.
27. Wang Y., Huang Y., Cao J., Reddy N.V. Experimental study on a new method of double side incremental forming. *Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference (October, 7-10, 2008, Evanston, USA)*. 2009. V. 1. P. 601-607. DOI: 10.1115/MSEC\_ICMP2008-72279
28. Shim M.-S., Park J.-J. The formability of aluminum sheet in incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. V. 113, Iss. 1-3. P. 654-658. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00679-3
29. Park J.-J., Kim Y.-H. Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. V. 140, Iss. 1-3. P. 447-453. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00768-4
30. Tomlenov A.M. *Teoriya plasticheskogo deformirovaniya metallov* [The theory of plastic deformation of metals]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1972. 408 p.
31. Kolmogorov V.L., Bogatov A.A., Migachev B.A., Zudov E.G., Freydenzon Yu.E., Freydenzon M.E. *Plastichnost' i razrushenie* [Plasticity and destruction]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1977. 336 p.

32. Filice L., Fratini L., Micari F. Analysis of material formability in incremental forming. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2002. V. 51, Iss. 1. P. 199-202. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61499-1
33. Jackson K., Allwood J. The mechanics of incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. V. 209, Iss. 3. P. 1158-1174. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.025
34. Malhotra R., Xue L., Belytschko T., Cao J. Mechanics of fracture in single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012. V. 212, Iss. 7. P. 1573-1590. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.021
35. Young D., Jeswiet J. Wall thickness variations in single-point incremental forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2004. V. 218, Iss. 11. P. 1453-1459. DOI: 10.1243/0954405042418400
36. Kim T.J., Yang D.Y. Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2000. V. 42, Iss. 7. P. 1271-1286. DOI: 10.1016/S0020-7403(99)00047-8
37. Emmens W.C., van den Boogaard A.H. An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. V. 209, Iss. 8. P. 3688-3695. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.10.003
38. Eyckens P., Belkassam B., Henrard C., Gu J., Sol H., Habraken A.M., Duflou J.R., van Bael A., van Houtte P. Strain evolution in the single point incremental forming process: digital image correlation measurement and finite element prediction. *International Journal of Material Forming*. 2011. V. 4, Iss. 1. P. 55-71. DOI: 10.1007/s12289-010-0995-6
39. Eyckens P., Van Bael A., Van Houtte P. An extended Marciniak–Kuczynski model for anisotropic sheet subjected to monotonic strain paths with through-thickness shear. *International Journal of Plasticity*. 2011. V. 27, Iss. 10. P. 1577-1597. DOI: 10.1016/j.ijplas.2011.03.008
40. Eyckens P., He S., Van Bael A., Van Houtte P., Duflou J. Forming limit predictions for the serrated strain paths in single point incremental sheet forming. *AIP Conference Proceedings*. 2007. V. 908. P. 141-146. DOI: 10.1063/1.2740802
41. Eyckens P., Moreau J.D.-I., Duflou J.R., Van Bael A., Van Houtte P. MK modelling of sheet formability in the incremental sheet forming process, taking into account through-thickness shear. *International Journal of Material Forming*. 2009. V. 2, Iss. 1. P. 379-382. DOI: 10.1007/s12289-009-0458-0
42. Eyckens P., Van Bael A., Aerens R., Duflou J., Van Houtte P. Small-scale finite element modelling of the plastic deformation zone in the incremental forming process. *International Journal of Material Forming*. 2008. V. 1. P. 1159-1162. DOI: 10.1007/s12289-008-0186-x
43. Allwood J.M., Shouler D.R. Generalised forming limit diagrams showing increased forming limits with non-planar stress states. *International Journal of Plasticity*. 2009. V. 25, Iss. 7. P. 1207-1230. DOI: 10.1016/j.ijplas.2008.11.001
44. Emmens W.C., van den Boogaard A.H. Incremental forming by continuous bending under tension — An experimental investigation. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. V. 209, Iss. 14. P. 5456-5463. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.04.023
45. Silva M.B., Skjoedt M., Martins P.A.F., Bay N. Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008. V. 48, Iss. 1. P. 73-83. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.07.004
46. Martins P.A.F., Bay N., Skjoedt M., Silva M.B. Theory of single point incremental forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2008. V. 57, Iss. 1. P. 247-252. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.047

47. Eyckens P. Formability in incremental sheet forming: generalization of the marciniak-kuczynski model. PhD Thesis. Katholieke Universiteit Leuven, 2010.

48. Hussain G., Gao L., Hayat N., Ziran Xu. A new formability indicator in single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. V. 209, Iss. 9. P. 4237-4242. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.11.024

49. Jeswiet J., Young D. Forming limit diagrams for single-point incremental forming of aluminium sheet. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2005. V. 219, Iss. 4. P. 359-364. DOI: 10.1243/095440505X32210

50. Hussain G., Gao L., Hayat N., Qijian L. The effect of variation in the curvature of part on the formability in incremental forming: An experimental investigation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007. V. 47, Iss. 14. P. 2177-2181. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2007.05.001

51. Behera A.K. Shape feature taxonomy development for toolpath optimisation in incremental sheet forming. PhD Thesis. Katholieke Universiteit Leuven, 2013.

52. Filice L., Ambrogio G., Micari F. On-line control of single point incremental forming operations through punch force monitoring. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2006. V. 55, Iss. 1. P. 245-248. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60408-9

53. Aereus R., Eyckens P., Van Bael A., Duflou J. Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010. V. 46, Iss. 9-12. P. 969-982. DOI: 10.1007/s00170-009-2160-2

54. Szekeres A., Ham M., Jeswiet J. Force measurement in pyramid shaped parts with a spindle mounted force sensor. *Key Engineering Materials*. 2007. V. 344. P. 551-558. DOI: 10.4028/0-87849-437-5.551

55. Emmens W.C., Van den Boogaard A.H. Strain in shear, and material behaviour in incremental forming. *Key Engineering Materials*. 2007. V. 344. P. 519-526. DOI: 10.4028/0-87849-437-5.519

56. Centeno G., Bagudanch I., Martínez-Donaire A.J., Garcia-Romeu M.L., Vallellano C. Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming. *Materials and Design*. 2014. V. 63. P. 20-29. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.05.066

57. Lu B., Fang Y., Xu D.K., Chen J., Ai S., Long H., Ou H., Cao J. Investigation of material deformation mechanism in double side incremental sheet forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. V. 93. P. 37-48. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2015.03.007

58. Gatea S., Lu B., Ou H., McCartney G. Numerical simulation and experimental investigation of ductile fracture in SPIF using modified GTN model. *MATEC Web of Conferences*. 2015. V. 21. DOI: 10.1051/mateconf/20152104013

59. Silva M.B., Nielsen P.S., Bay N., Martins P.A.F. Failure mechanisms in single-point incremental forming of metals. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. V. 56, Iss. 9-12. P. 893-903. DOI: 10.1007/s00170-011-3254-1

60. Fu Z., Mo J., Chen L., Chen W. Using genetic algorithm-back propagation neural network prediction and finite-element model simulation to optimize the process of multiple-step incremental air-bending forming of sheet metal. *Materials and Design*. 2010. V. 31, Iss. 1. P. 267-277. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.06.019

61. Yamashita M., Gotoh M., Atsumi S.-Y. Numerical simulation of incremental forming of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. V. 199, Iss. 1-3. P. 163-172. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.07.037

62. Ambrogio G., Costantino I., De Napoli L., Filice L., Fratini L., Muzzupappa M. Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: a numerical and experimental investigation. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. V. 153-154, Iss. 1-3. P. 501-507. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.139
63. Bambach M., Hirt G., Ames J. Quantitative validation of FEM simulations for incremental sheet forming using optical deformation measurement. *Advanced Materials Research*. 2005. V. 6-8. P. 509-516. DOI: 10.4028/0-87849-972-5.509
64. Henrard C., Habraken A.M., Szekeres A., Duflou J.R., He S., Van Bael A., Van Houtte P. Comparison of FEM simulations for the incremental forming process. *Advanced Materials Research*. 2005. V. 6-8. P. 533-540. DOI: 10.4028/0-87849-972-5.533
65. Hirt G., Ames J., Bambach M. Validation of FEA for asymmetric incremental sheet forming by on-line measurements of deformation and tool forces. *Production Engineering*. 2006. V. 13, Iss. 1. P. 39-44.
66. Zettler J., Rezai H., Taleb-Araghi B., Bambach M., Hirt G. Incremental sheet forming – process simulation with LS-DYNA. *6th German LS-DYNA forum (October, 11-12, 2007, Frankenthal, Germany)*.
67. Yeshiwas Z., Krishnaiah A. Extraction of coordinate points for the numerical simulation of single point incremental forming using Microsoft Excel. *International Conference on Emerging Trends in Engineering (ICETE) (March, 22-23, 2019, India)*. 2020. V. 2. DOI: 10.1007/978-3-030-24314-2\_69
68. Xu G.-L., Jarosz A., Saavedra-Rosas J. Extending dynamic mining subsidence models. *Proceedings of International Academic Forum in China (June, 18-19, 2011, Jiaozuo, China)*. P. 5-10.
69. Konov N. Programming of industrial robots in SprutCAM. *SAPR i Grafika*. 2016. No. 5 (235). P. 18-21. (In Russ.)
70. De Alvarenga R., Grechnikov F.V., Erisov Ya.A., Surudin S.V., Petrov I.N. *Programma dlya eksporta traektorii dvizheniya deformiruyushchego instrumenta iz CAM v CAE sistemu* [Program for exporting the trajectory of the deforming tool from the CAM to the CAE system]. Certificate of state registration of the computer program No. 2020663935, 2020. (Publ. 05.11.2020).