

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЁВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

С. В. СУРУДИН, Д. Г. ЧЕРНИКОВ

ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ИНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по направлениям подготовки 15.03.01 Машиностроение

САМАРА
Издательство Самарского университета
2025

УДК 621.7.043(075)
ББК К623.3я7
С900

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В. Н. С а м о х в а л о в;
д-р техн. наук, проф. К. В. Н и к и т и н

Сурудин, Сергей Викторович

С900 Основы процесса инкрементального формообразования:
учебное пособие / *С. В. Сурудин, Д. Г. Черников.* – Самара:
Издательство Самарского университета, 2025. – 76 с.

ISBN 978-5-7883-2247-6

В учебном пособии рассмотрены основы процесса инкрементального формообразования, оборудование, применяемое для данной технологии, теоретические основы и технологические параметры процесса, особенности методики численного моделирования и области применения технологии.

Предназначено для студентов технических вузов, а также технологов и инженеров, работающих с технологией инкрементального формообразования.

УДК 621.7.043(075)
ББК К623.3я7

ISBN 978-5-7883-2247-6

© Самарский университет, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОСНОВЫ ПРОЦЕССА	6
2 ОБОРУДОВАНИЕ.....	9
3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА.....	16
4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА.....	29
4.1 Деформирующий инструмент	29
4.2 Предельные деформационные возможности при инкрементальном формообразовании	31
4.3 Стратегии построения маршрута движения инструмента...	33
5 ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ.....	40
6 МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА ДВИЖЕНИЯ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В ПРОГРАММНОМ ПРОДУКТЕ SPRUTSAM.....	44
6.1 Описание программного продукта SprutSAM.....	44
6.2 Методика построения траектории при послойном движении деформирующего инструмента.....	45
6.2.1 Импорт геометрии.....	45
6.2.2 Создание траектории движения деформирующего инструмента	52
6.2.3 Моделирование траектории движения деформирующего инструмента.....	60
6.3 Методика построения траектории при движении деформирующего инструмента по спирали.....	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	69
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	70

ВВЕДЕНИЕ

Это учебное пособие написано для студентов технических вузов, а также для технологов и инженеров, работающих в машиностроительной сфере. Она может использоваться для индивидуальной подготовки к экзаменам и для повышения базовых знаний в теории листовой штамповки.

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 требует значительных финансовых вложений. Более того установка и наладка штампов на гидравлические и кривошипные прессы является трудоемким процессом и требует определенный штат вспомогательного персонала. Если в условиях массового и крупносерийного производства данные затраты окупаются за счет 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 один 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, суть которого заключается в локальном поэтапном деформировании отдельных частей листовой заготовки по заданной программе. Применение технологии инкрементальной штамповки

позволяет быстро реагировать на изменение производственной программы при значительном снижении трудоемкости подготовки производства и затрат на штамповую оснастку. Кроме того реализация гибкого подхода к производству изделий на основе инкрементального формообразования 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.

В этом учебном пособии приводятся основы процесса инкрементального формообразования, оборудование применяемое для данной технологии, теоретические основы и технологические параметры процесса, особенности методики численного моделирования инкрементального формообразования и области применения технологии.

1 ОСНОВЫ ПРОЦЕССА

Инкрементальное формообразование (ИФ) – процесс обработки листового материала, в котором заготовка локально деформируется пуансоном со сферическим торцом путем перемещения одного или нескольких инструментов вдоль заданного направления (рис. 1) [1].

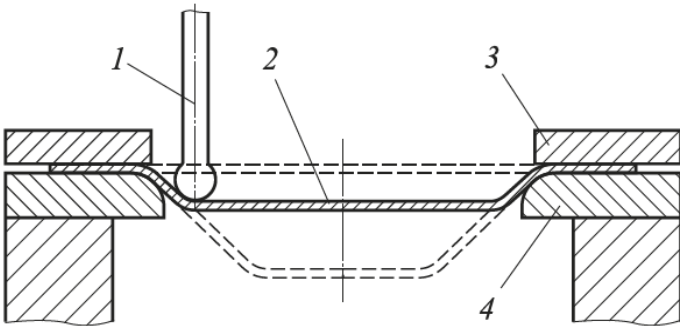


Рис. 1. Принципиальная схема инкрементальной штамповки:
1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – прижим; 4 – нижняя плита [1]

Для повышения точности получаемых изделий и расширения технологических возможностей используют различные схемы формоизменения [2]. Типовые схемы процесса ИФ представлены на рисунке 2. Формообразование по схеме, приведенной на рисунке 2а, выполняется одним пуансоном без дополнительных подпоров. За счет действия изгибающих моментов точность полученной заготовки невысокая и ее применение нерационально при значительных степенях формоизменения. Эти недостатки устранены при использовании различных видов подпоров (рис. 2б–2д), обеспечивающих жесткую конструкцию и исключаящих действие изгибающего момента, но требующих дополнительной оснастки.

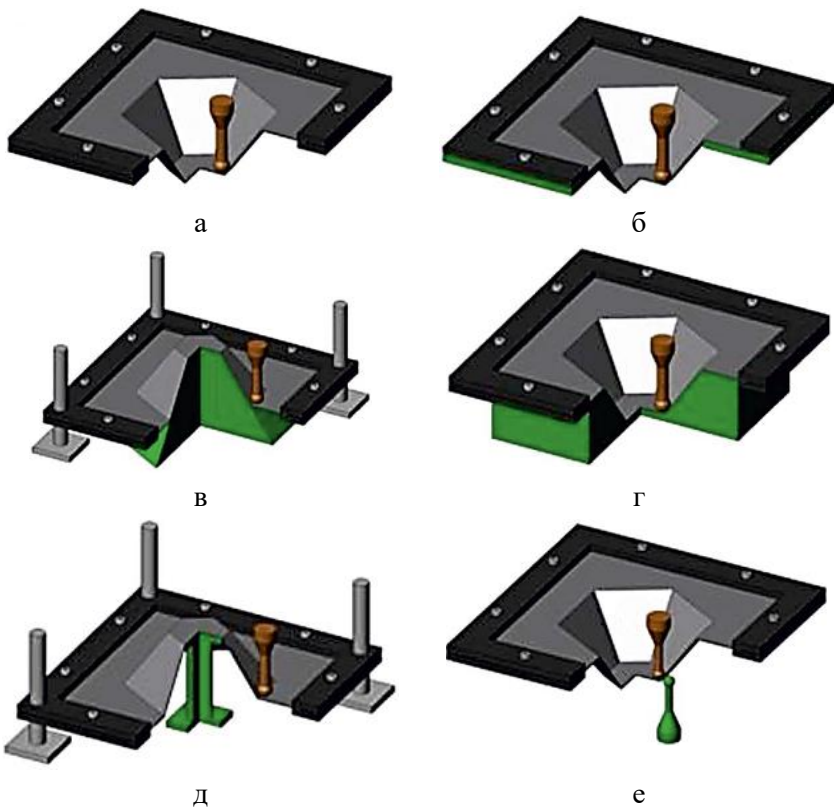


Рис. 2. Схемы инкрементальной формовки (а) с одним пуансоном, (б) с пуансоном и опорной плитой под заготовкой, (в) и (г) с опорной матрицей, (д) с нижним подпором, (е) с контр-пуансоном [2]

Схема, представленная на рисунке 2е, имеет преимущества всех перечисленных схем благодаря наличию контр-пуансона, который перемещается совместно с основным пуансоном. Таким образом снижается влияние изгибающего момента и появляется возможность получения более сложных форм изделия, в том числе и с внутренними углами.

Эксперименты по формованию с применением контрпуансона показали, что система допускает две основные стратегии формования для изготовления деталей из листового металла: вспомогательная поддержка и локальная поддержка (рис. 3). Использование стратегии локальной поддержки дает лучшие результаты с точки зрения формуемости [3].

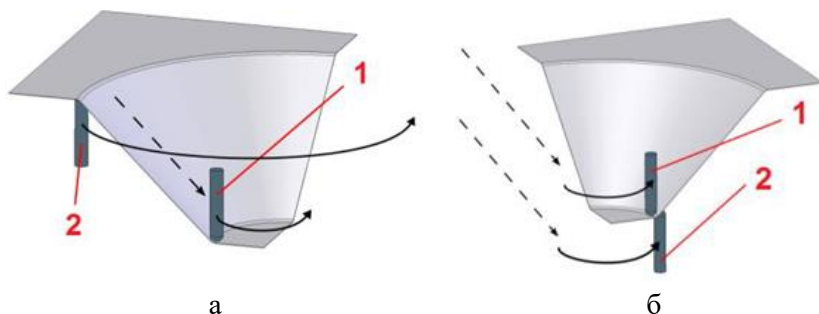


Рис. 3. Стратегии формирования:

- (а) стратегия А: вспомогательная поддержка, (б) стратегия Б: локальная поддержка 1 – деформирующий инструмент; 2 – инструмент поддержки [3]

В случае стратегии А второй инструмент выступает в качестве опорной пластины, движется синхронно с первым инструментом и не выходит за пределы первого уровня контура опорного инструмента. В случае стратегии Б второй инструмент перемещается синхронно с деформирующим инструментом и обеспечивает непрерывную локальную поддержку на каждом уровне траектории инструмента. Схему с применением двух формирующих инструментов назвали двухсторонним инкрементальным формообразованием (ДИФ).

2 ОБОРУДОВАНИЕ

Для реализации процесса ИФ применяется следующее оборудование: трех- и многокоординатные фрезерные станки с ЧПУ, промышленные роботы-манипуляторы и специализированные установки [4].

Так как помимо выбранной схемы ИФ на точность изделия оказывает влияние и жесткость используемого оборудования, то при прочих равных условиях наивысшую точность обеспечивают фрезерные станки, имеющие жесткость около 200 кН/мм (жесткость роботов-манипуляторов редко достигает 120 кН/мм) [5-6].

Несмотря на это, промышленные роботы-манипуляторы используются чаще чем фрезерные станки, особенно в исследовательских целях [7-11]. 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 грузоподъемности и рабочей зоны робота, что ограничивает возможности применения роботов-манипуляторов для ИФ заготовок большой толщины (от 4 мм) и/или высокопрочных сплавов [12]. Описание способа ИФ с использованием двух роботов-манипуляторов (рис. 4) можно найти в запатентованном решении [13].

Для реализации некоторых из приведенных выше схем ИФ, для которых стандартные фрезерные станки и роботы-манипуляторы не подходят, разработаны специализированные установки.

В предыдущие десятилетия можно было наблюдать развитие гибких технологий формоизменения (особенно в ИФ), что проявилось в ряде патентов и исследовательских проектах [14], особенно в Европе, в Японии и в Соединенных Штатах Америки.



Рис. 4. Двухстороннее инкрементальное формование с помощью синхронизированных роботов АВВ [13]

Наиболее значительных результатов в области создания специализированных установок для ИФ достигла компания Ford и Northwestern University (рис. 5), которые разработали установку для ИФ на основе двух гексоподов (платформ Стюарта) [15]. Компанией Ford была разработана система управления данной установкой, обеспечивающая синхронное перемещение деформирующих инструментов, а в Northwestern University была спроектирована система локального нагрева заготовки путем пропускания тока через заготовку между двумя пуансонами для повышения пластичности материала [16].



а



б

Рис. 5. Машины ДИФ разработанные (а) компанией Ford и (б) Northwestern University [15-16]

Также компанией Ford [17] была разработана машина для технологии прототипирования листового металла RApid Freeform (RAFFT) (рис. 6). Этот вариант процесса, как и в [18-19], является очевидным расширением технологии ИФ. Однако асинхронное управление требует дополнительных датчиков и является дорогостоящим. Франзен и команда предложили механизм под названием «Dyna(mic)-Die» [20], но он ограничен вращательными симметричными движениями и также нуждается в синхронизированном управлении.



Рис. 6. Машина RAFFT [17]

В работе [21] 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 (рис. 7). Недостатком данного механизма является то, что С-образная рама ограничивает рабочее пространство, кроме того уменьшается точность при увеличении усилия формообразования.

О более ранних вариантах машин можно ознакомиться в работе [12], первый же метод и прототип был описан в патенте Матсубары [22]. Он вдохновил многих последующих изобретений. Наиболее актуальным является патент, поданный Matsubara, Amino и др. в 1999 году [23]. Описание патента является исчерпывающим и охватывает множество технологических особенностей.

ИФ возможно реализовать не только с применением специальных машин, а также с применением различных механизмов. На

рисунках 8-9 соответственно показаны варианты механизмов для небольших и больших размеров обрабатываемой поверхности.



Рис. 7. Пример применения С-образной рамы на роботe-манипуляторе [21]

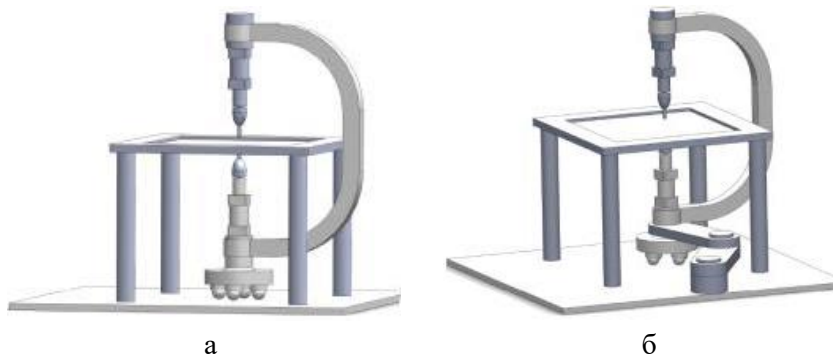
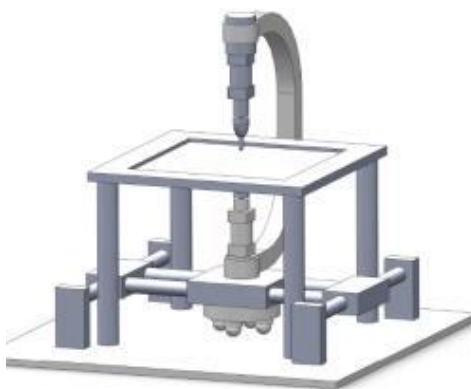


Рис. 8. Варианты механизмов для небольших размеров обрабатываемой поверхности (окончание рис. на стр. 14):
(а) без механизма стабилизатора; (б) с механизмом ротационного стабилизатора



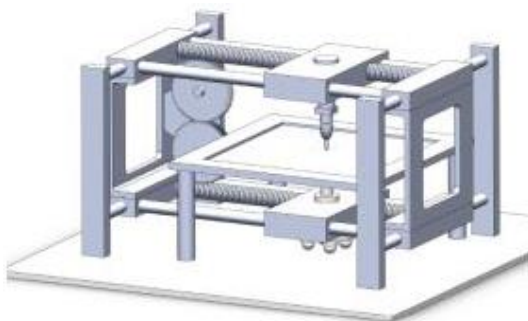
В

Рис. 8. Варианты механизмов для небольших размеров обрабатываемой поверхности (начало рис. на стр. 13):
(в) с механизмом ротационного и поступательного стабилизатора

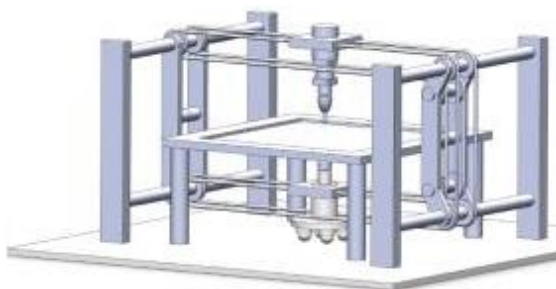


а

Рис. 9. Варианты механизмов для больших размеров обрабатываемой поверхности (а) с линейными направляющими (окончание рис. на стр. 15)



а



б

Рис. 9. Варианты механизмов для больших размеров обрабатываемой поверхности (а) с линейными направляющими, (б) с элементами передачи со шпиндельно-зубчатой передачей, (в) с механизмом скольжения ременного шкива (начало рис. на стр. 14)

Эти механизмы обеспечивают безопасное и точное перемещение формовочных инструментов без применения сложных и дорогих конструкций. Система может быть легко смонтирована и демонтирована, и поэтому она применима для изготовления деталей со сложной геометрией детали даже в небольших сериях.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА

Главной особенностью ИФ, теоретическому и экспериментальному исследованию которой посвящены многие работы, является увеличение предельных деформационных возможностей материала по сравнению с обычными процессами листовой штамповки [24-25]. Известно, что в значительной степени предельные деформации материала, достижимые при обработке металлов давлением, определяются напряженно-деформированным состоянием [26-27], поэтому основным направлением исследований ИФ является изучение напряжений и деформаций. Так в работе [28] сделан вывод о том, что во время процесса ИФ преобладают деформации растяжения. В работе [29] 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 [30-31] установлено, что деформация при ИФ является комбинацией растяжения, изгиба и сдвига.

Предложено несколько механизмов ИФ, объясняющих увеличение предельных деформаций. В работах [32-33], 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 [34-36], 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 [37-38]. В результате установлено, что на деформационные возможности материала большое влияние оказывает деформация

сдвига по толщине. Хотя в работе [39] наоборот показано, что сдвиг по толщине не влияет на предельную деформацию при ИФ.

В работе [40] на основе испытания на изгиб с растяжением сделано предположение, что основным фактором для увеличения деформационных возможностей при ИФ является изгиб. В работе [41] 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 [42] 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 [43]. Поэтому в работе [44] 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 [45]. 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. [46]. 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° [47-48].

Еще одним параметром для оценки предельных деформаций материала при ИФ является усилие процесса, контролируя которое можно прогнозировать момент разрушения заготовки [49]. 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 [50]. Однако, хотя данный подход и применим для конических деталей, он не подходит для пирамидальных [51]. Это связано с тем, что ребра пирамиды действуют как ребра жесткости и сдерживают увеличение усилия, происходящее непосредственно перед разрушением.

В работе [35] обобщено влияние нормального напряжения по толщине и циклического нагружения на локализацию деформации, устойчивость и высокие деформационные возможности материала в процессе ИФ. В работах [33, 52] 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 [28]. Например, в работе [53] 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 [54]. В таких случаях применима модифицированная модель Гурсона-Твергаарда-Нидлмана [55], 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 еще отсутствует [26, 56]. Более того стандартные модели материалов и конечных элементов, доступные в программах для расчетов методом конечных элементов, не позволяют учесть всех особенностей процесса ИФ.

На рисунке 10 схематично показаны основные зоны деформации. Металл деформируется и принимает полусферическую форму кончика наконечника. Детали, производимые ИФ, могут иметь сложную форму, но в целом их можно классифицировать как комбинации тех, которые схематически изображены на рисунке 10. Выделено три основных зоны деформации: А – плоские зоны с плоской деформацией растяжения; В – осесимметричные зоны с плоской деформацией растяжения; С – угловые зоны с равномерным двухосным растяжением.

Следует отметить, что между этими режимами деформации существуют другие варианты, при которых не возникает ни плоского деформационного растяжения, ни равного двухосного растяжения. Однако в аналитической модели будут рассмотрены только экстремальные режимы деформации, которые могут быть обнаружены

в ИФ. Состояния деформации и напряжения, действующие в этих зонах, будут определяться из условий равновесия локального элемента оболочки CDEF при контактных силах трения (рисунок 11).

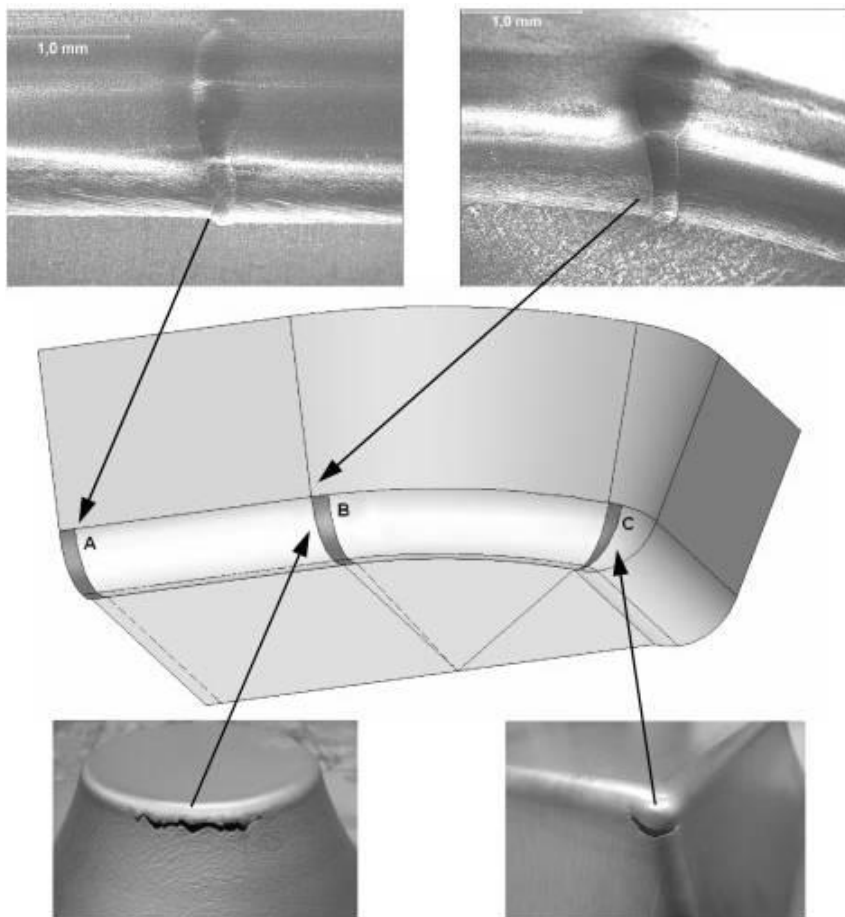


Рис. 10. Основные зоны деформации при ИФ [42]

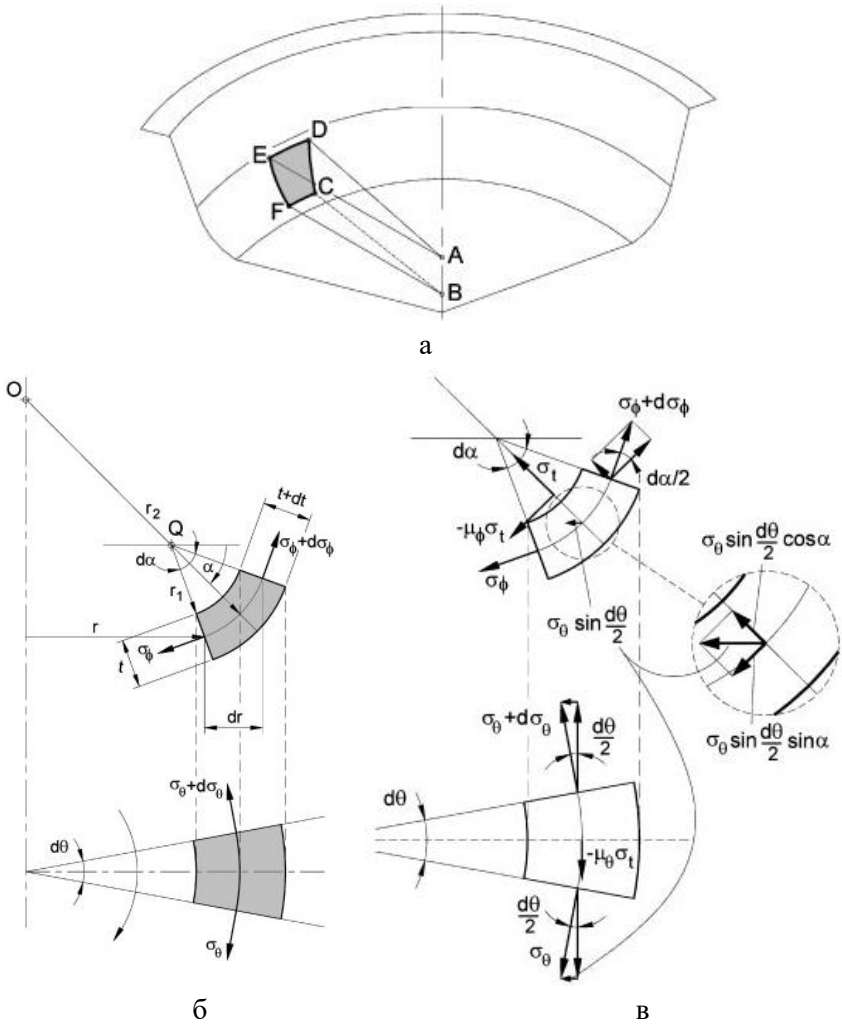


Рис. 11. Локальный элемент оболочки:

- а – схематичное изображение элемента оболочки в перспективе;
- б – схематичное изображение оболочечного элемента после разреза аксиальной меридиональной плоскостью (виде сверху);
- в – действующие напряжения [42]

В ИФ локальный элемент оболочки подвергается действию нормальных сил, поперечных сил и изгибающих моментов. При разработке методики использовались допущения:

1. Материал считается жестким – идеально пластичным, т.е. эффекты деформационного упрочнения не учитываются.

2. Материал считается трансверсально изотропным.

3. Предполагается, что результирующее напряжение трения, возникающее на границе контакта инструмента с листом, состоит из двух составляющих в плоскости: меридиональной составляющей $\mu_\phi \sigma_t$ из-за ступенчатого движения инструмента и окружной компоненты $\mu_\theta \sigma_t$ из-за круговой подачи в сочетании с вращением инструмента. Последнее предположение, которое является нетрадиционным способом моделирования трения, введен для удобства и подразумевает, что коэффициент трения $\mu = \sqrt{\mu_\phi^2 + \mu_\theta^2}$.

Окружное направление.

Напряжения, действующие на локальный элемент оболочки, показаны на рисунках 12б и 12в. Самый высокий член напряжения в окружном направлении обусловлен фрикционной границей контакта инструмент-плита, и предполагается, что его точка приложения совпадает с центром элемента. Его знак зависит от баланса относительной скорости между инструментом и поверхностью листа.

Уравнение равновесия в окружном направлении запишется, как:

$$\sigma_\theta r_1 d_\alpha \left(t + \frac{dt}{2} \right) - \mu_\theta \sigma_t r_1 d_\alpha \left(r + \frac{dr}{2} \right) d\theta = (\sigma_\theta + d\sigma_\theta) r_1 d_\alpha \left(t + \frac{dt}{2} \right). \quad (1)$$

Если пренебречь членами более высокого порядка и предположить, что $rd\theta \approx t$, то

$$d\sigma_\theta = -\mu_\theta \sigma_t \frac{rd\theta}{t} \approx -\mu_\theta \sigma_t. \quad (2)$$

Последнее предположение $rd\theta \approx t$, вытекает из наблюдения, что ширина пятна контакта в окружном направлении приблизительно равна толщине листа.

В направлении толщины.

Уравнение равновесия вдоль направления толщины запишется, как:

$$\begin{aligned} &\sigma_t r d\theta r_1 d_\alpha + \sigma_\varphi r d\theta t \sin\left(\frac{d_\alpha}{2}\right) + (\sigma_\varphi + d\sigma_\varphi)(r + dr) d\theta (t + dt) \sin\left(\frac{d_\alpha}{2}\right) \\ &+ \sigma_\theta r_1 d_\alpha t \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \cos \alpha + (\sigma_\theta + d\sigma_\theta) r_1 d_\alpha t \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \cos \alpha = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

После пренебрежения членами более высокого порядка и упрощения приведенного выше уравнения с учетом того, что $r_2 = r / \cos \alpha$:

$$\sigma_t \left(\frac{1}{t} - \frac{\mu_\theta}{2r_2} \right) + \frac{\sigma_\varphi}{r_1} + \frac{\sigma_\theta}{r_2} = 0. \quad (4)$$

Поскольку член $\mu_\theta / 2r_2$, помещенный в круглые скобки, очень мал по сравнению с $1/t$, следует, что уравнение (4) может быть дополнительно упрощено до

$$\frac{\sigma_t}{t} + \frac{\sigma_\varphi}{r_1} + \frac{\sigma_\theta}{r_2} = 0. \quad (5)$$

С физической точки зрения последнее упрощение означает, что эффекты трения в окружном направлении не учитываются при анализе.

Меридиональное направление.

Уравнение равновесия в меридиональном направлении запишется, как:

$$(\sigma_\varphi + d\sigma_\varphi)(r + dr)d\theta(t + dt) - \sigma_\varphi r d\theta t + \mu_\varphi \sigma_t r d\theta r_1 d_\alpha - \sigma_\theta \frac{d\theta}{2} r_1 d_\alpha t \sin \alpha - (\sigma_\theta + d\sigma_\theta) \frac{d\theta}{2} r_1 d_\alpha t \sin \alpha = 0. \quad (6)$$

После пренебрежения членами более высокого порядка и упрощения приведенного выше уравнения с учетом того, что $dr = r_1 d_\alpha \sin \alpha$

$$\frac{d\sigma_\varphi}{dr} + \frac{\sigma_\varphi - \sigma_\theta}{r} + \sigma_t \left(\frac{\mu_\varphi}{t \sin \alpha} + \frac{\mu_\theta}{2r} \right) + \frac{\sigma_\varphi}{t} \frac{dt}{dr} = 0. \quad (7)$$

Поскольку $r \gg t \sin \alpha$, предыдущее уравнение можно переписать в упрощенном виде

$$\frac{d\sigma_\varphi}{dr} + \frac{\sigma_\varphi - \sigma_\theta}{r} + \frac{\mu_\varphi - \sigma_t}{t \sin \alpha} + \frac{\sigma_\varphi}{t} \frac{dt}{dr} = 0. \quad (8)$$

С физической точки зрения последнее уравнение еще раз подтверждает, что эффектами трения в окружном направлении при анализе можно пренебречь. В результате можно использовать приближенное значение коэффициента трения: $\mu \approx \mu_\varphi$.

Напряженное состояние, действующее в локальном элементе оболочки, который соответствует полусферической форме инструмента, получено из предыдущих уравнений равновесия, примененных к трем основным зонам деформации:

- А – плоские зоны с плоской деформацией растяжения;
- В – осесимметричные зоны с плоской деформацией растяжения;
- С – угловые зоны с равномерным двухосным растяжением.

Плоские и осесимметричные зоны с плоской деформацией растяжения.

Комбинируя упрощенную форму уравнения равновесия в направлении толщины с геометрическими условиями, ($r_2 \gg r$ и $r_2 \gg t$), следует, что отношение окружного напряжением σ_θ к радиусу r_2 по нормали к поверхности локального элемента оболочки можно пренебречь; таким образом

$$\frac{\sigma_\theta}{r_2} \approx 0. \quad (9)$$

Следовательно, уравнение (5) может принять следующий упрощенный вид

$$\frac{\sigma_t}{t} + \frac{\sigma_\phi}{r_1} = 0. \quad (10)$$

В этих условиях соотношение между нормальным контактным давлением $p = -\sigma_t$, действующим на локальный элемент оболочки, меридиональным напряжением σ_ϕ , толщиной листа t и радиусом формирующего инструмента ($r_1 = r_{tool}$) может быть получено как

$$\sigma_t = -\sigma_\phi \frac{t}{r_{tool}}. \quad (11)$$

Полную характеристику напряженного состояния в небольшой локализованной пластической зоне можно получить, если предположить, что ИФ в плоских и осесимметричных поверхностях выполняется в условиях плоской деформации ($d\varepsilon_\theta = 0$ и $d\varepsilon_\phi = -d\varepsilon_t$).

Рассматривая определяющие уравнения Леви – фон Мизеса в условиях плоской деформации

$$d\varepsilon_\theta = 0 \rightarrow \sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_t + \sigma_\phi), \quad (12)$$

главные напряжения, действующие на элемент, можно определить как

$$\sigma_\phi = \sigma_1 > 0; \sigma_\theta = \sigma_2; \sigma_t = \sigma_3 < 0; (\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3), \quad (13)$$

где $|\sigma_t| < |\sigma_\phi|$, так как $r_{tool} > t$.

Хотя относительные значения главных напряжений могут изменяться в зависимости от параметров процесса, связанных с толщиной листа и радиусом инструмента для формования, член $\sigma_1 - \sigma_3$ должен быть постоянным в соответствии с критерием текучести. Вставка этого члена в уравнение (11) приводит к уравнению для расчета меридионального напряжения σ_ϕ , действующего в локальном элементе оболочки, которое определяется выражением

$$\sigma_\phi = \frac{\sigma_Y}{(1 + t / r_{tool})}. \quad (14)$$

Стоит отметить, что σ_Y следует заменить на $\sigma = K\varepsilon^n$ в случае, когда материал подчиняется степенной кривой деформационного упрочнения, и $t = t_0 \sin \lambda$ в соответствии с геометрической зависимостью, обеспечиваемой законом синуса.

Угловые зоны с равномерным двухосным растяжением.

Предполагается, что углы деталей из листового металла, изготовленных SPIF, пластически деформируются в условиях равного двухосного растяжения ($d\varepsilon_\phi = d\varepsilon_\theta > 0$, $d\varepsilon_t < 0$ и $\sigma_\phi = \sigma_\theta$).

Используя упрощенную форму уравнения равновесия (5) в направлении толщины и принимая во внимание геометрические условия, преобладающие в ВС ($r_1 = r_2$), следует, что

$$\frac{\sigma_t}{t} + 2 \frac{\sigma_\phi}{r_1} = 0. \quad (15)$$

В этих условиях соотношение между нормальным контактным давлением $p = -\sigma_t$, действующим на локальный элемент оболочки, меридиональным напряжением σ_ϕ , толщиной листа t и радиусом формирующего инструмента ($r_1 = r_{tool}$) может быть получено как

$$\sigma_t = -2\sigma_\phi \frac{t}{r_{tool}}. \quad (16)$$

Полную характеристику напряженного состояния в небольшой локализованной пластической зоне, расположенной в углах частей SPIF, можно легко получить, если принять во внимание вышеупомянутое предположение о равных условиях двухосного растяжения, как

$$\sigma_\phi = \sigma_\theta = \sigma_1 > 0; \sigma_t = \sigma_3 < 0. \quad (17)$$

где $|\sigma_t| < |\sigma_\phi|$, так как $r_{tool} > t$.

Аналогично выводу выражения (14), меридиональное напряжение, действующего в локальном элементе оболочки, запишется как

$$\sigma_\phi = \sigma_\theta = \frac{\sigma_Y}{(1 + 2t / r_{tool})} \quad (18)$$

В таблице 1 объединены состояния напряжений и деформаций, которые обычно встречаются в общих процессах ИФ.

Таблица 1. Состояния напряжений и деформаций в процессе ИФ

Зоны деформации	Деформационное состояние	Напряженное состояние	Гидростатическое напряжение
Плоские и осесимметричные зоны	$d\varepsilon_\phi = -d\varepsilon_t > 0$ $d\varepsilon_\theta = 0$ $d\varepsilon_t < 0$	$\sigma_\phi = \sigma_1 = \frac{\sigma_Y}{1+t/r_{tool}} > 0$ $\sigma_\theta = \sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$ $\sigma_t = \sigma_3 = -\sigma_Y \frac{t}{r_{tool} + t} < 0$	$\sigma_m = \frac{\sigma_Y}{2} \frac{r_{tool} - t}{r_{tool} + t}$
Угловые зоны	$d\varepsilon_\phi = d\varepsilon_\theta > 0$ $d\varepsilon_t < 0$	$\sigma_\phi = \sigma_\theta = \sigma_1 = \frac{\sigma_Y}{1+2t/r_{tool}} > 0$ $\sigma_t = \sigma_3 = -2\sigma_Y \frac{t}{(r_{tool} + 2t)} < 0$	$\sigma_m = \frac{2\sigma_Y}{3} \frac{r_{tool} - t}{r_{tool} + 2t}$
Обычная штамповка	$d\varepsilon_\phi = d\varepsilon_\theta > 0$ $d\varepsilon_t < 0$	$\sigma_\phi = \sigma_\theta = \sigma_1 = \frac{\sigma_Y}{1+t/r_{punch}} > 0$ $\sigma_t = \sigma_3 = -\sigma_Y \frac{t}{(r_{punch} + t)} < 0$	$\sigma_m = \frac{2\sigma_Y}{3} \frac{r_{punch} - t/2}{r_{punch} + t}$

4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА

4.1 Деформирующий инструмент

Пуансоны для ИФ могут быть разных типов в зависимости от материала инструмента, покрытия, диаметра и геометрической формы. Материал инструмента и покрытие влияют на усилие формования и шероховатость поверхности формируемых деталей. Основываясь на геометрической форме, инструменты можно классифицировать как полусферические, шарикообразные (рис. 12) и плоские (рис. 13), хотя существуют и другие формы.



Рис. 12. Инструмент с шарикообразным наконечником
(диаметр 6 мм, 10 мм и 16 мм)

Установлено, что инструменты с плоским концом обеспечивают лучшую точность и формуемость профиля по сравнению с

полусферическими инструментами. Диаметр инструмента влияет на глубину формовки и на шероховатость поверхности формируемых деталей. Установлено, что для увеличения предельного угла формования необходимо использовать инструменты с уменьшенным диаметром. Однако при меньшем диаметре инструмента для получения детали требуется большее количество проходов, что увеличивает время формования. Кроме того, инструмент должен иметь достаточную прочность для формирования листа, а это, в свою очередь, требует, чтобы диаметр был достаточно большим, чтобы гарантировать это. Обычно диаметр инструмента варьируется от 5 до 100 мм.



Рис. 13. Инструмент с плоским наконечником
(диаметр 6 мм, 10 мм и 16 мм)

4.2 Предельные деформационные возможности при инкрементальном формообразовании

Как было сказано выше формруемость ИФ выше, чем у обычных процессов штамповки. Пределы формирования материала могут быть охарактеризованы максимальным углом стенки до возникновения разрушения α (рис. 14). Этот максимальный угол зависит от типа материала, толщины листа и параметров процесса, таких как радиус инструмента, размера шага, скорость подачи, локальная температура листа и т.д. Обычно для определения этого угла используются два типа деталей: детали с постоянным углом стенки, такие как конус, или детали с переменным углом стенки, такие как гиперboloидная чаша.

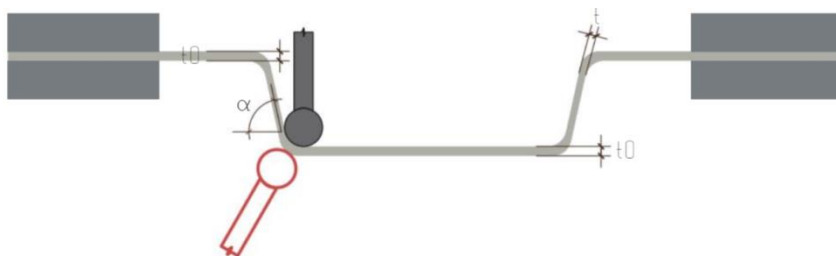


Рис. 14. Предельный угол формообразования

Список таких углов стенок для разных материалов представлен в Таблице 2 (где 1 – усеченный конус; 2 – варьирующийся угол стенки конусообразного усеченного конуса; Однако для деталей с переменным углом стенок угол стенки разрушения будет зависеть от формируемой геометрической формы и может превышать оценку, полученную для деталей с постоянным углом стенки, на 4° .

Таблица 2. Максимально достижимый угол наклона стенки усеченного конуса для разных материалов

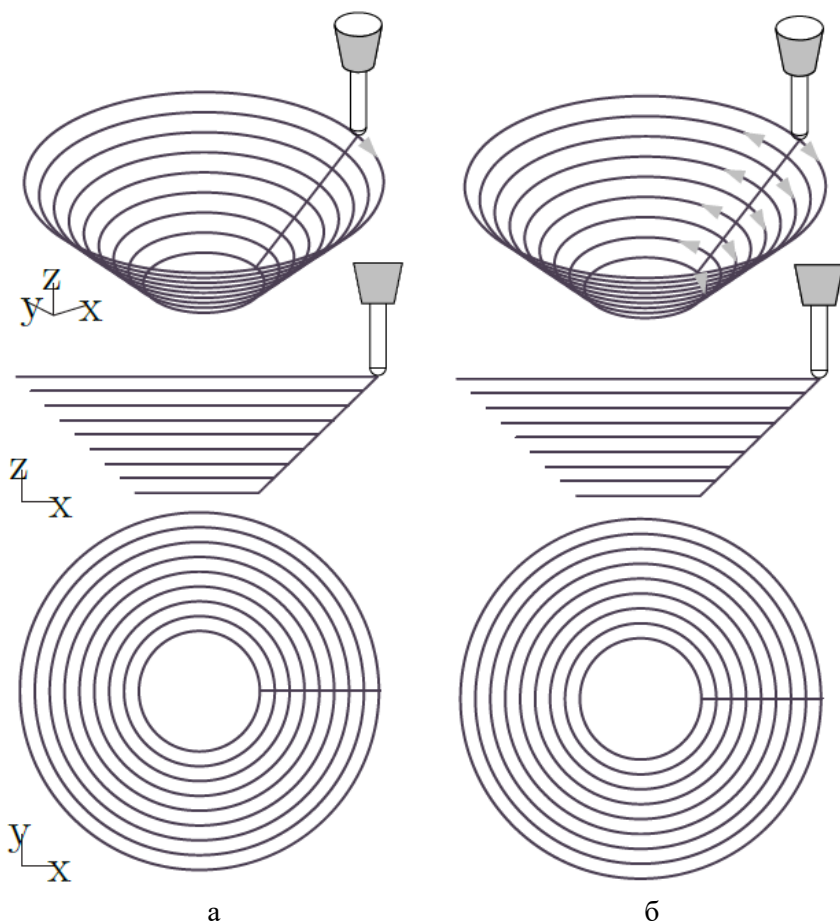
Материал	Геометрия образца	Диаметр инструмента, мм	Толщина образца, мм	Максимальный угол стенки
65Cr2	1	10	0,5	57°
AA 1050-O	1	10	1,5	76°
AA 2024-T3	1	10	1	42°
AA 3003-O	1	10	0,85	70°
AA 3003-O	1	10	1,2	71°
AA 3003-O	1	10	2	76°
AA 3103	1	10	1,5	75°
AA 5086	1	10	0,8	62°
AA 5182	1	10	1,25	64°
AA 5182	1	25,4	0,93	63°
AA 5754	1	10	1	64°
AA 5754	1	10	1,5	71°
AA 6111-T4P	1	25,4	0,93	53°
AA 6114-T4	1	12	1	60°
AISI 304	1	10	0,4	63°
Латунь	1	12	1	40°
Медь	1	12	1	65°
DC01	1	10	1	67°
DC04	1	10	1	64°
DDQ	1	12	1	70°
DP600	2	16	1	68°
DP780	2	16	1	45°
DP1000	2	16	1	39°
HSS	1	12	1	65°
Ti grade 2	1	10	0,5	47°
TiAl6V4	1	10	0,6	32°

4.3 Стратегии построения маршрута движения инструмента

На сегодняшний день исследовано влияние различных типов стратегий траектории движения инструмента на окончательно сформированную деталь. Использование контурной траектории приводит к получению детали с отчетливо видимыми углублениями, обычно в виде линии или кривой, по которой инструмент спускается вниз. Кроме того, осевое усилие достигает пика на каждом шаге инструмента вниз. Для предотвращения этого, можно использовать спиральную траекторию.

Большинство операций, выполняемых ИФ, начинают процесс с границы детали и постепенно деформируют лист по подготовленной траектории. Кончик инструмента повторяет контур подготовленной геометрии, увеличивая глубину формования по ходу движения. Это увеличение выполняется в соответствии с определенным размером шага по вертикали (z) с типичными значениями от 0,1 до 2 мм. На рисунке 15 представлены некоторые варианты траекторий с постоянным шагом z для ИФ. Инструмент следует внешнему контуру детали, для каждого типа траектории переход между уровнями отличается. В траекториях всех типов инструмент перемещается от одного уровня к следующему по оси z и по диагонали по осям xz . Это создает линию, по которой инструмент перемещается с уровня на уровень. Разница между стратегиями заключается в изменении направления движения между уровнями. В стратегии ступенчатого типа формирующие контуры задаются таким же образом, но когда инструмент переходит на следующий уровень, он перемещается по осям xu , а затем по оси z . В качестве альтернативы инструмент может отойти от поверхности перпендикулярно. Расстояние от кончика инструмента до поверхности, создаваемое горизонтальным отклонением на ступенчатом переходе, помогает удалить линию, созданную инструментом при его

перемещении от уровня к уровню. В качестве последней альтернативы в траектории спирального или спирального типа головка инструмента следует непрерывной траектории, очерчивая форму геометрии. Инструмент всегда перемещается по осям x , y и z , создавая спиральный узор в сформированной детали. Помимо улучшения качества поверхности, этот тип траектории обеспечивает лучшую геометрическую точность.



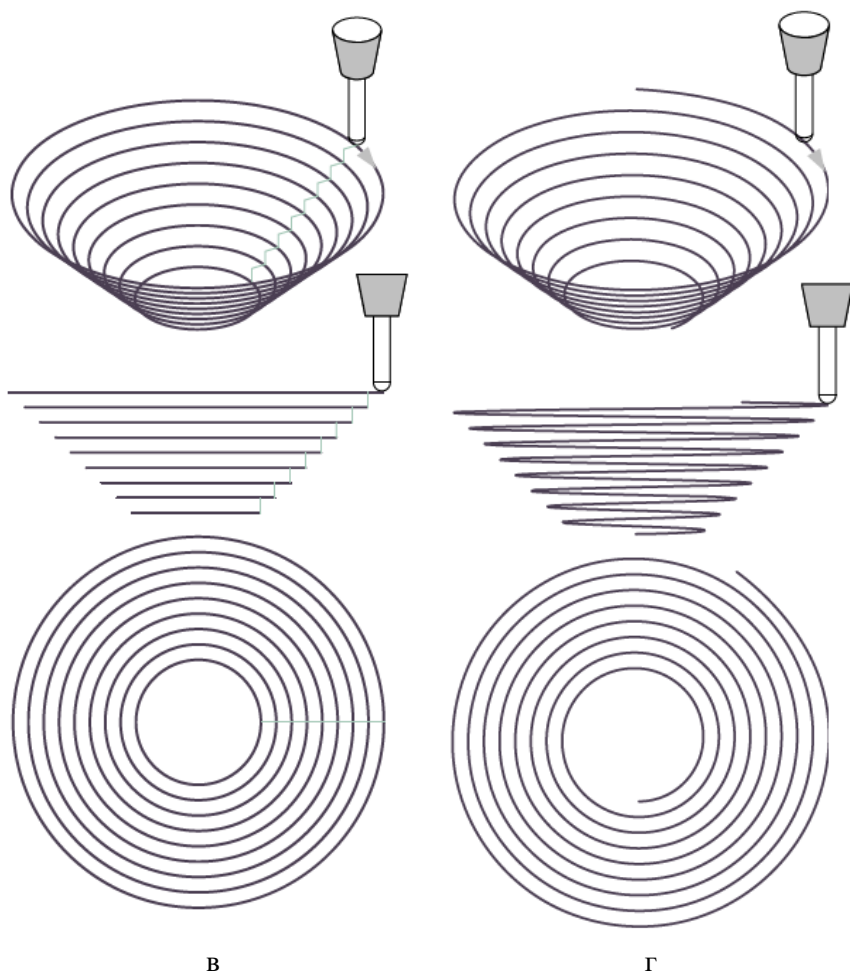


Рис. 15. Типы траекторий с постоянным шагом:
 (а) контурная, (б) переменная, (в) ступенчатая, (г) спиральная

Применение стратегии с постоянным шагом по z дает хорошие результаты при изготовлении простых деталей с постоянным наклоном стенки. Фактически, этот ступенчатый путь от верха до

низа формы, в котором инструмент следует серии последовательных контуров с фиксированной глубиной ступени, является самым простым, но имеет два недостатка. В частности, лист «маркируется» в точке перехода между последовательными слоями, за исключением спирального подхода, и качество на поверхности или рядом с ней плохое, особенно при использовании большой глубины шага (более 0,5 мм). Если чистота обработки поверхности детали является важным аспектом процесса, в основном для стенок с переменным уклоном или форм произвольной формы, необходимо изменить траекторию деформирования с постоянной глубиной ступеньки. В этом случае выполнение деформирования с постоянной высотой гребешка может дать лучшие результаты. Это ступенчатый путь от верха к низу формы, в котором инструмент следует серии последовательных контуров с переменной глубиной ступени (максимальная из которых должна быть определена), чтобы поддерживать постоянное значение гребешка. Высота гребешка – это максимальное перпендикулярное расстояние от формируемой поверхности и инструмента. Такой вид пути уменьшает недостатки первого типа и, в частности, на плоских или неглубоких поверхностях показывают лучшее качество. На рисунке 16 представлена разница между постоянным шагом и фиксированной величины гребешка при формировании детали контейнерного типа с переменным уклоном.

Использование различных типов представленных траекторий движения инструмента широко распространено, поскольку они просты в создании с использованием коммерческого программного обеспечения CAD/CAM и дают очень приемлемые результаты при быстрой работе. Однако эти одноэтапные стратегии требуют ограничения геометрической сложности. Чтобы расширить гибкость процесса ИФ, можно использовать многоступенчатое формообразование.

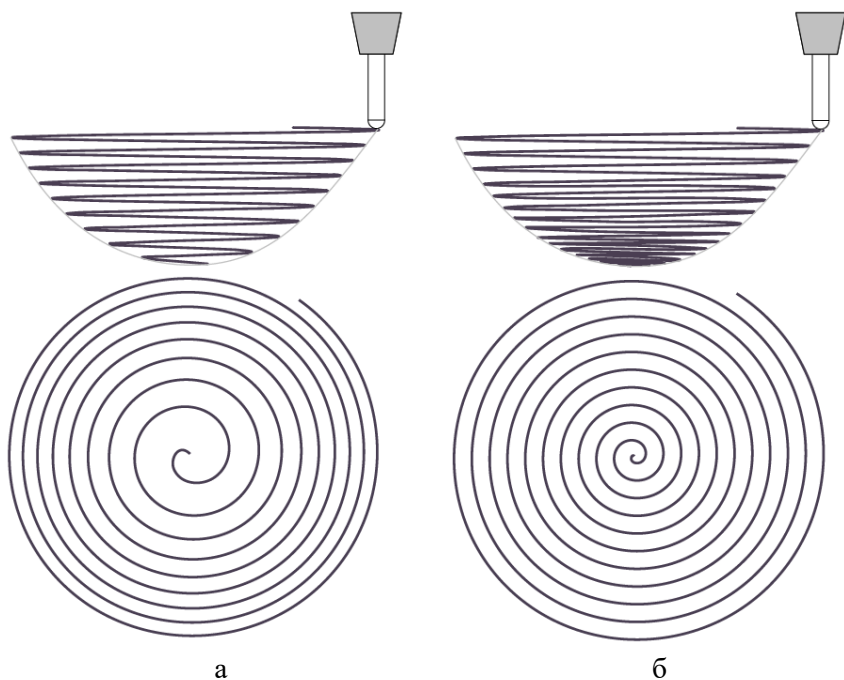


Рис. 16. Спиральная траектория для деталей с переменным уклоном: (а) фиксированный шаг по оси Z, (б) фиксированная высота гребешка

Есть два основных варианта использования стратегии многоступенчатого формообразования. С одной стороны, эту стратегию можно использовать для улучшения гибкости, позволяя увеличивать углы вытяжки. С другой стороны, многоступенчатость может использоваться для повышения точности и детализации некоторых деталей сложной формы. Основная цель - обеспечить изготовление деталей с углами вытяжки, превышающими предел одноступенчатого формования. С помощью этой многоэтапной стратегии можно изготавливать детали с вертикальными стенками и даже с отрицательным уклоном. На рис. 17 (а) и (б) схематично представлены

2- и 5-ступенчатые подходы для увеличения угла вытяжки. На первом этапе заготовка растягивается в конус 45 мм. Следующие этапы постепенно перемещают середину этой секции к углу. Все этапы, кроме первого, могут быть выполнены инструментом, движущимся вниз или вверх.

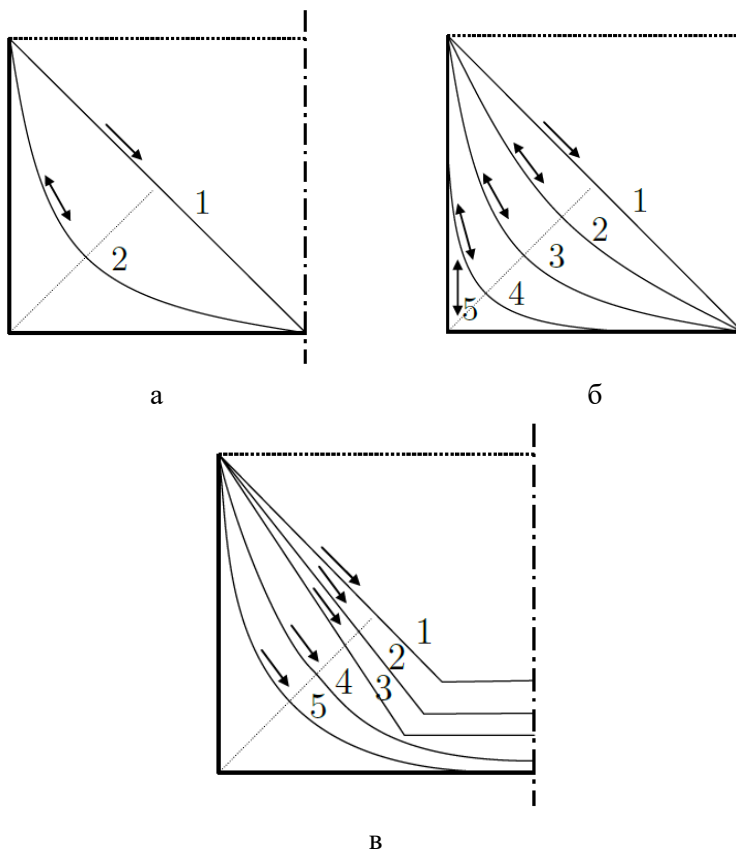


Рис. 17. Стратегии многоступенчатого формообразования для увеличения угла вытяжки [41]

Первый этап может быть выполнен только движением инструмента вниз. Конус имеет постоянный угол наклона рисунок близок к 45° , следующие этапы можно выполнять либо в движении верх-низ, либо в движении низ-верх.

Обнаружено, что формуемость листового металла зависит от уклона по дну (глубины) изготавливаемой детали. Если уклон изменяется по глубине, то толщина оболочки уменьшается быстрее, чем в случае с фиксированным уклоном. На рисунке 17 (в) показан другой метод многоступенчатой формовки, где первые этапы выполняются с фиксированным наклоном, а кривизна достигается только на последних двух. Таким образом, такой механизм может повысить точность размеров и задержать разрушение. Следовательно, это даст возможность формировать лист под большим углом формования.

5 ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ

Одной из сильных сторон ИФ является его применение в автомобильной промышленности. Несмотря на то, что это отрасль массового производства с большим количеством деталей из листового металла, производимых традиционными процессами, ИФ имеет большой потенциал для использования в качестве инструмента для создания прототипов новых деталей или для изготовления деталей для реставрации старинных автомобилей. На рисунке 18 показан капот Honda S800, изготовленный ИФ для спортивного автомобиля S800. Для этого существующая деталь была измерена с помощью трехмерной измерительной машины, и координаты были использованы для изготовления детали.



Рис. 18. Внутренняя и внешняя стороны персонализированного капота Honda S800 [12]

На рисунке 19 показаны пример изготовления двери методом ИФ, выполненный Toyota.



Рис. 19. Дверь автомобиля Toyota, изготовленная методом ИФ [12]

На рисунке 20 показана масштабная модель передней части японского сверхскоростного поезда Shinkansen, построенного компанией Amino.



Рис. 20. Модель передней части сверхскоростного поезда [1]

ИФ находит применение в медицине для разработки индивидуальных протезов или другого оборудования. Медицинские имплантаты одни из наиболее исследуемых приложений ИФ из-за необходимости адаптации к форме человеческого тела. Конкретные области применения включают опору для лодыжки, черепную пластину, коленный протез, протез заднего таза, стоматологические продукты и лицевые имплантаты.

Одна из возможных областей применения – изготовление черепных пластин, используемых в реконструктивной хирургии черепа. Эти пластины довольно дороги и требуют длительного времени для изготовления обычными способами. Пример из практики показывает применимость процесса ИФ в этой области. На рисунке 21 показан пример этого приложения.

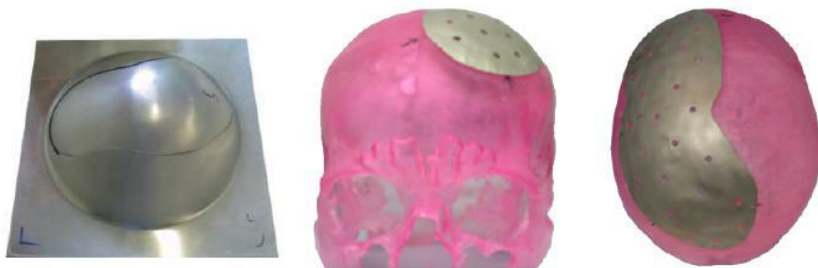


Рис. 21. Прототипы черепных пластин [41]

В области стоматологии существует естественная потребность в персонализированных устройствах, которые изготавливаются на заказ для пациента, область, в которой ИФ является весьма перспективным. Технология ИФ применена для изготовления основы (каркаса) полного протеза.

В обоих случаях качество поверхности, а также точность размеров были удовлетворены с отклонениями размеров менее 1 мм. SPIF позволил изготавливать протез с дополнительным уменьше-

нием массы за счет использования более тонких листов, что очень желательно с точки зрения пациента и комфорта ношения.

Существует опыт производства рукомойника индивидуального дизайна. На рис. 22 показана нижняя сторона отформованной детали, и окончательный собранный прототип.



Рис. 22. Рукомойник [41]

Несколько самонесущих металлических конструкций произвольной формы были спроектированы и разработаны в рамках исследования процессов ИФ. Были разработаны конструкции, в основном кровельные конструкции, состоящие из большого набора отформованных панелей. На рис. 23 показан прототип конструкции крыши размером 1,5 x 0,8 м, состоящей из 8 панелей.



Рис. 23. Прототип конструкции крыши [41]

6 МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА ДВИЖЕНИЯ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В ПРОГРАММНОМ ПРОДУКТЕ SPRUTCAM

6.1 Описание программного продукта SprutCAM

SprutCAM – современная полнофункциональная САМ-система, предназначенная для разработки *управляющих программ* обработки деталей различной сложности на фрезерных, токарных, режущих станках, роботах, токарно-фрезерных обрабатывающих центрах с ЧПУ с количеством непрерывных осей до 5 и электроэрозионных станков с 2-х и 4-х координатной обработкой. SprutCAM используется при изготовлении штампов, пресс-форм, литейных форм, прототипов изделий, мастер-моделей, деталей машин и конструкций, оригинальных изделий, шаблонов; при гравировке и вырезке надписей и изображений.

SprutCAM работает непосредственно с геометрическими объектами исходной модели без предварительной аппроксимации или триангуляции. Это позволяет, во-первых, максимально экономно использовать ресурсы компьютера, а, во-вторых, производить расчет траектории инструмента с любой необходимой точностью.

Геометрическая модель изготавливаемой детали, заготовки, оснастки и т.п. может быть подготовлена в любой САД-системе и передана в SprutCAM через файл формата IGES, DXF, STL, VRML, Postscript, 3dm, SGM, STEP или Parasolid. SprutCAM имеет множество функций для последующего преобразования модели, а также встроенную среду двумерных параметрических построений для создания и редактирования 2D-элементов. При формировании моделей детали, заготовки и оснастки можно сшивать в тела поверхностные модели и создавать различными способами объёмные модели на базе имеющихся кривых. Широкий набор типов техно-

логических операций и функции управления их параметрами позволяют формировать оптимальные процессы изготовления деталей различных видов. Контроль полученной траектории инструмента может производиться во встроенной среде моделирования обработки. Для генерации управляющих программ имеется множество файлов настройки на распространенные системы ЧПУ.

В общем случае создание процесса обработки в SprutCAM происходит в следующей последовательности:

- импорт модели изготавливаемой детали, исходной заготовки и оснастки, заранее подготовленной в САД-системе в форматах перечисленных выше;

- задание технологии, представляющей собой одну или несколько последовательно заданных операций обработки различных типов. Для каждой операции указывается, что и как требуется обработать;

- моделирование процесса обработки для проверки правильности траектории и контроля столкновения инструмента с деталью и оснасткой, а также контроль превышения допустимых значений технологических параметров.

6.2 Методика построения траектории при послыном движении деформирующего инструмента

6.2.1 Импорт геометрии

Построение маршрута движения в SprutCAM, начинается с импорта геометрии заготовки, получаемой детали, элементов оснастки, предварительно подготовленных в САД программе (в данной работе используется Siemens NX). Доступ к элементам модели осуществляется, как через окно структуры модели (рис. 24), так и посредством интерактивного выбора на экране.

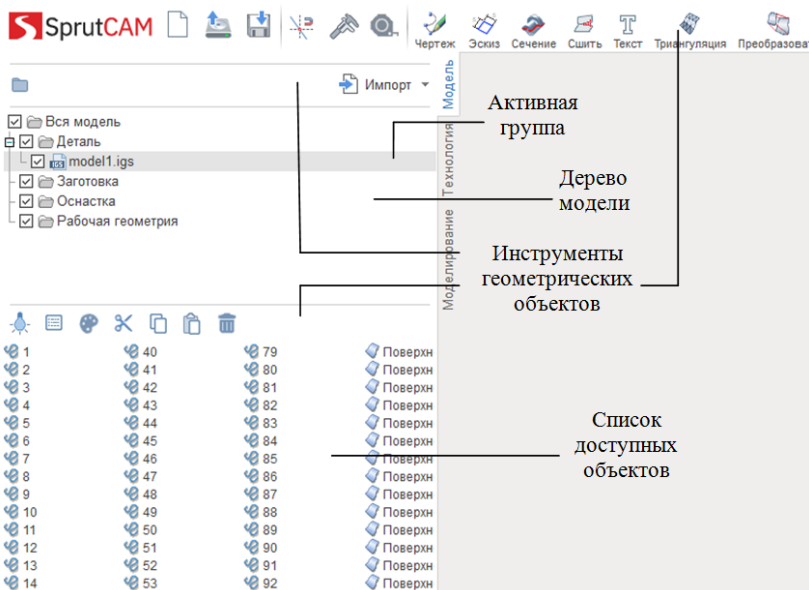


Рис. 24. Дерево импортируемой модели

Геометрическая модель в системе представляется в виде совокупности геометрических объектов. Именно объекты с геометрической сущностью влияют на форму траектории инструмента в технологических операциях.

Имеются следующие типы геометрических объектов: поверхность; сетка; кривая; точка; ребро.

В процессе импорта в окне отображается текущая информация о ходе процесса чтения файла и создания геометрических объектов (рис. 25). Чтение файла и формирование геометрической модели происходят одновременно. На первом этапе происходит чтение файла и анализ структуры модели, а на втором – формирование геометрической модели.



Рис. 25. Статистические данные импортируемой геометрии

SprutCAM не позволяет создавать непосредственно геометрические 3D модели, однако имеет набор функций для получения сечений 3D моделей, имеет функцию создания и редактирования чертежей и эскизов, а так же позволяет проецировать и производить пространственные манипуляции с импортированной геометрией (рис. 26).

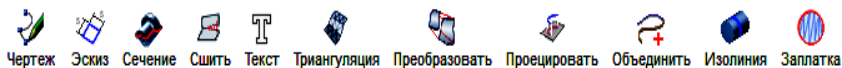


Рис. 26. Функции преобразования геометрических объектов

Создание новой системы координат инициируется выбором пункта выпадающего меню на панели систем координат (рис. 27).

Панель управления системами координат расположена в нижнем правом углу главного окна.

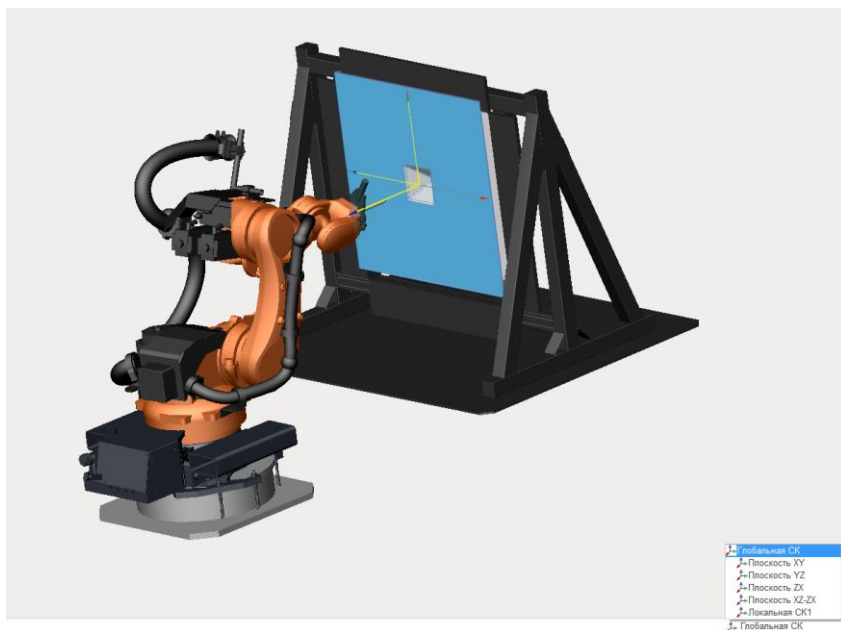


Рис. 27. Геометрическая система координат

Система координат задается точкой начала координат и двумя направляющими векторами X и Y . При создании системы координат сначала необходимо задать точку начала координат.

Далее в разделе «Технология» задаем параметры протекания обработки. Для расчета траектории движения инструмента и получения управляющей программы в SprutCAM необходимо задать требуемые исходные данные и параметры обработки. Такими базовыми параметрами является станок, на котором будет производиться обработка (в нашем случае это робот-манипулятор KUKA KR160 R1570 nano), а также последовательность технологических

операций, описывающих основные этапы обработки. Затем система рассчитывает траекторию движения инструмента и добавляет необходимые технологические команды для получения управляющей программы, удовлетворяющей всем заданным требованиям.

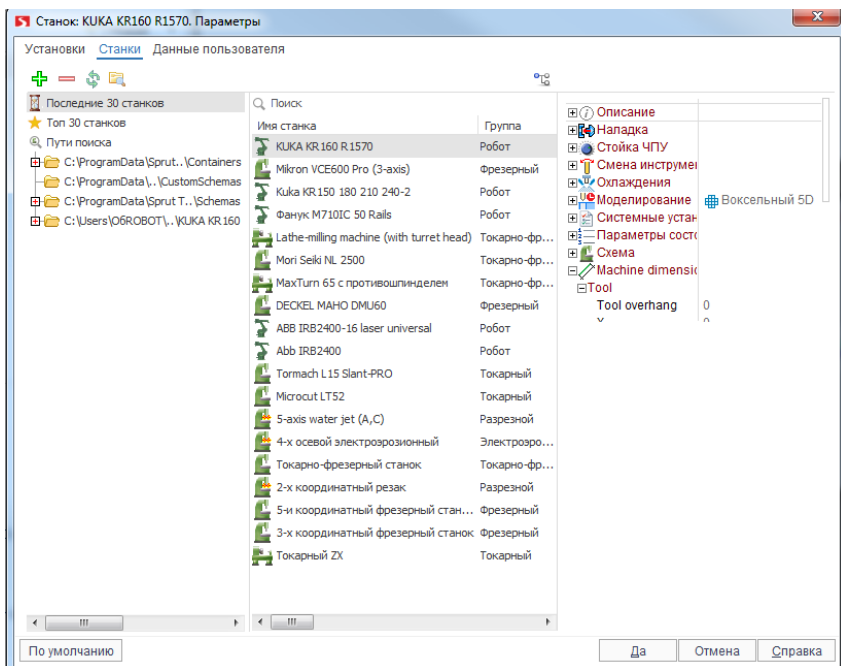


Рис. 28. Меню выбора оборудования обработки

Проектирование технологического процесса начинается с выбора робота, на котором будет производиться обработка. Для выбора необходимо перейти в корневой узел технологического процесса, нажать кнопку «Параметры» и выбрать закладку «Станки» (рис. 28). В левой части открывшегося окна расположен список папок, в которых осуществляется поиск файлов машин (они объединены в группу «Пути поиска»), а также две специальные груп-

пы. При выборе одной из групп или папок в левом списке на панели в средней части окна отобразится доступное оборудование, находящиеся в данной группе или папке. При выделении того или иного оборудования на панели в правой части окна отображаются его свойства. От типа выбранного оборудования и его параметров зависят набор доступных операций, их возможности, параметры по умолчанию и дальнейшее поведение системы.

Следующим этапом является создание новой технологической операции для процесса инкрементальной штамповки. Для этого в разделе технология необходимо перейти в пункт «Новая операция» (рис. 29).

Окно разделено на три части. Слева расположен список групп операций. Здесь можно выбрать одну из групп или отобразить все операции на средней панели окна. Также можно выбрать элемент «Все операции». Тогда в списке будут показаны все доступные операции. В зависимости от формы и качества поверхности получаемого изделия, а также типа используемого оборудования операции условно разделены на несколько групп:

1. Черновые операции обеспечивают выборку всего материала заготовки, который находится вне обрабатываемой модели. Как правило черновые операции используются для первичной выборки материала в случаях, когда форма и размеры обрабатываемой детали значительно отличаются от формы и размеров заготовки.

2. Чистовые операции производят только обработку поверхности детали, без выборки материала. Обычно чистовые операции используются для окончательного формирования поверхности детали после предварительной (например, черновой) обработки, а также и без неё в случаях небольшого отличия детали от заготовки или при использовании заготовки из легкообрабатываемого материала.

3. Операции доработки позволяют производить обработку только в тех областях, в которых остался не удаленный материал после обработки предыдущими операциями. При этом создаются те же самые черновые или чистовые операции, только по-другому инициализируются параметры. Операции доработки позволяют оптимизировать обработку сложных деталей.

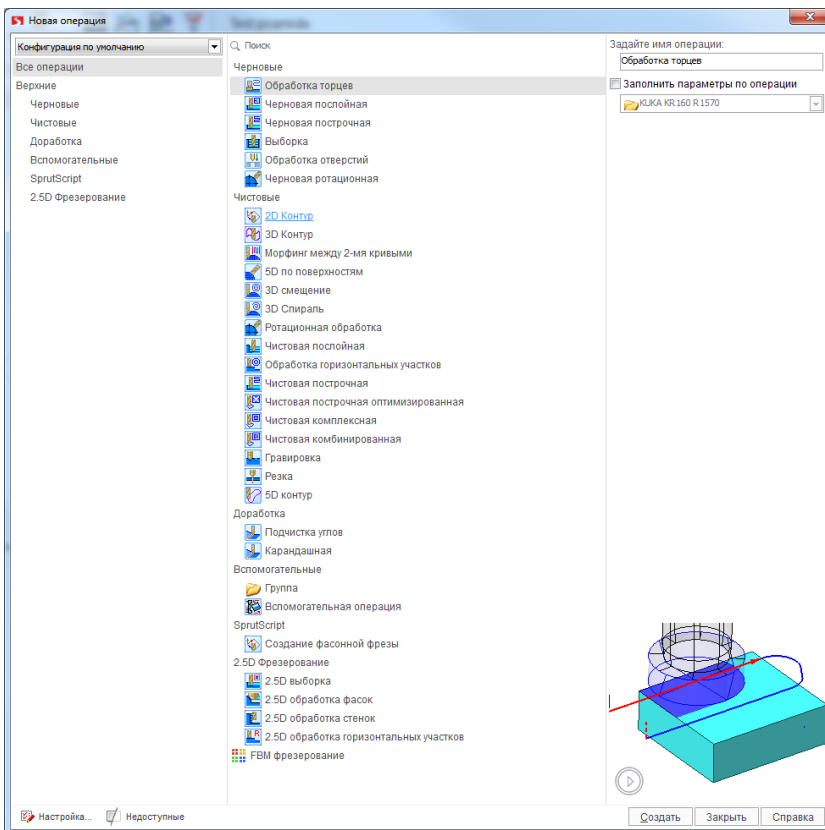


Рис. 29. Меню выбора операции обработки

Так как инкрементальная штамповка не является стандартной операцией обработки, то необходимо на основании уже имеющихся в библиотеке операций создать новую с собственными настройками. Для этого создается экземпляр операции, наиболее близкий по способу обработки, на основе которого, варьируя различными параметрами (шаг, траектория обработки, способ перехода, направление обработки и так далее), получаем новую операцию.

Наиболее близкими операциями для инкрементальной штамповки являются: «5D по поверхностям» и «3D спираль».

6.2.2 Создание траектории движения деформирующего инструмента

Подобрав необходимое оборудование и выбрав тип операции, в разделе «Наладка» задаются базовые значения координат коннектора заготовки, инструмента обработки и другие параметры машины, для выбранной операции. В разделе «Наладка» можно выбрать метод моделирования, а также регулировать положения осей выбранного оборудования.

Прежде чем приступить к формированию последовательности операций необходимо определить, что требуется получить (деталь), из чего (заготовка), а потом уже как этого достичь (последовательность обработки). Деталь техпроцесса будет контролироваться большинством создаваемых в дальнейшем операций вне зависимости от того, обрабатывает указанная операция всю деталь либо какую-то её часть.

После выбора операции в окне «Параметры операции» определяют, что и каким образом будет обрабатываться. После выбора соответствующего узла внутри операции нижняя часть окна меняется и предоставляет инструментарий необходимый для его редактирования (рис. 30).

В появившемся окне в разделе «Рабочее задание» необходимо добавить обрабатываемые поверхности и кривые линии в рабочее задание, на основании которых и будет создаваться траектория движения инструмента. Обрабатываемые поверхности определяют где будет рассчитываться траектория.

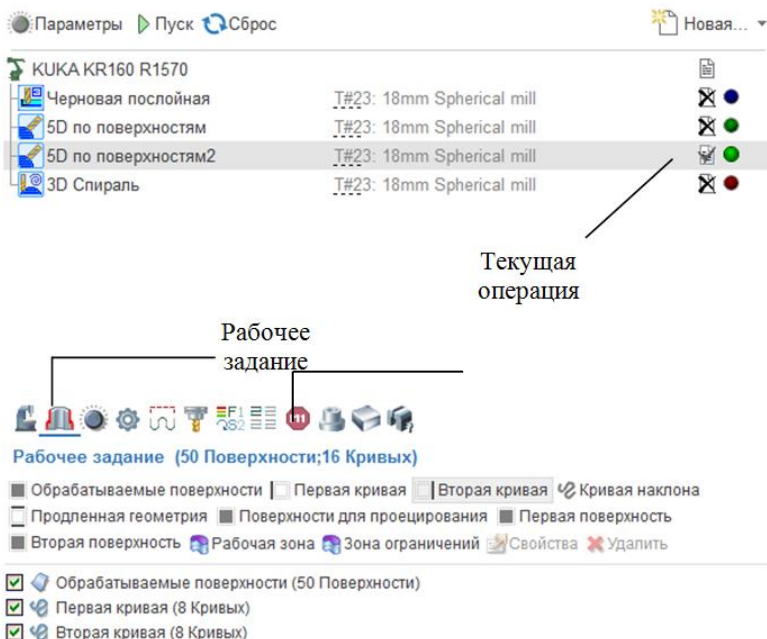


Рис. 30. Изменение параметров создаваемой операции

Первая кривая используется в стратегии для определения кривой или нескольких кривых, параллельно к которым будет рассчитываться проходы. Также в стратегии применяется морфинг между двумя кривыми, чтобы определить первую кривую.

Следующим шагом необходимо выбрать стратегию траектории (рис. 31).

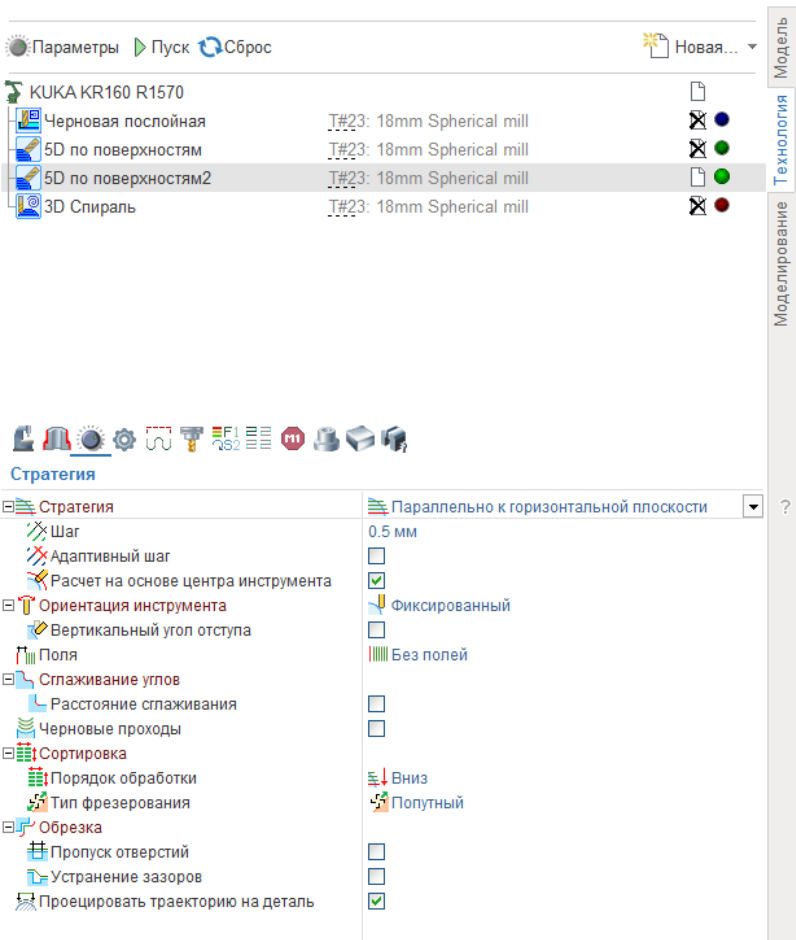


Рис. 31. Изменение стратегии траектории

Стратегия проходов генерируются в результате пересечения поверхностей обработки с параллельными плоскостями. Предусмотрены три варианта. Плоскости параллельны к оси инструмента, также как в чистовой построчной операции (рис. 32, а).

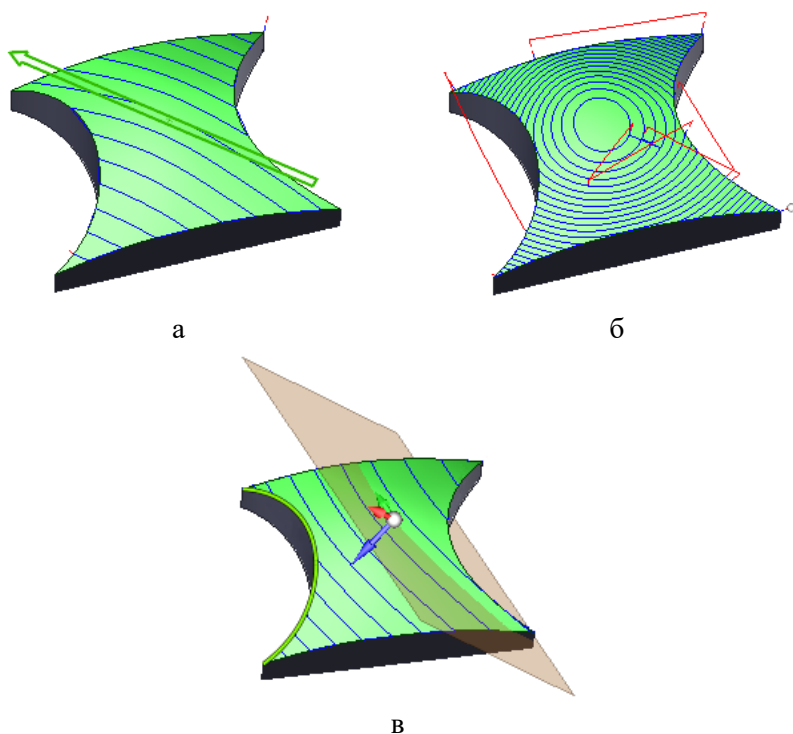


Рис. 32. Стратегии задания траектории:

а – плоскости параллельны оси инструмента;

б – плоскости перпендикулярны оси инструмента;

в – плоскости направлены под углом относительно оси инструмента

Кроме того, можно изменить угол поворота плоскости вокруг оси инструмента. В случае обработки заготовки инкрементальной штамповкой используется стратегия, когда плоскости перпендикулярны к оси инструмента, как в траектории чистовой послойной операции (рис. 32, б). Также плоскости могут быть свободно расположены в пространстве независимо от ориентации оси инструмента (рисунок рис. 32, в).

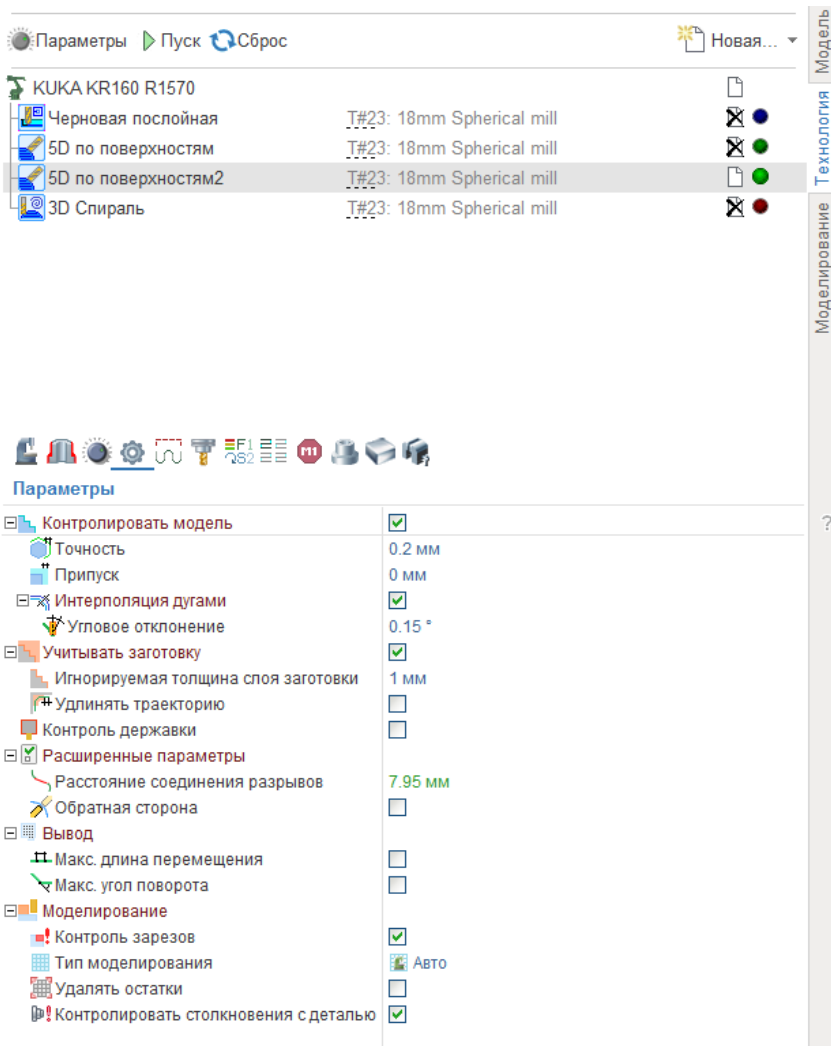


Рис. 33. Дополнительные параметры операции

После выбора необходимой стратегии обработки, выберем шаг (расстояние между проходами), исходя из размера выбранного

инструмента и качества получаемой детали. В этом же разделе выбирается порядок и ориентация инструмента в момент обработки, а также имеется функция, позволяющая спроецировать разработанную стратегию траектории на деталь.

Далее, в разделе параметры задается точность позиционирования инструмента относительно заготовки и в случае необходимости задается припуск (рис. 33).

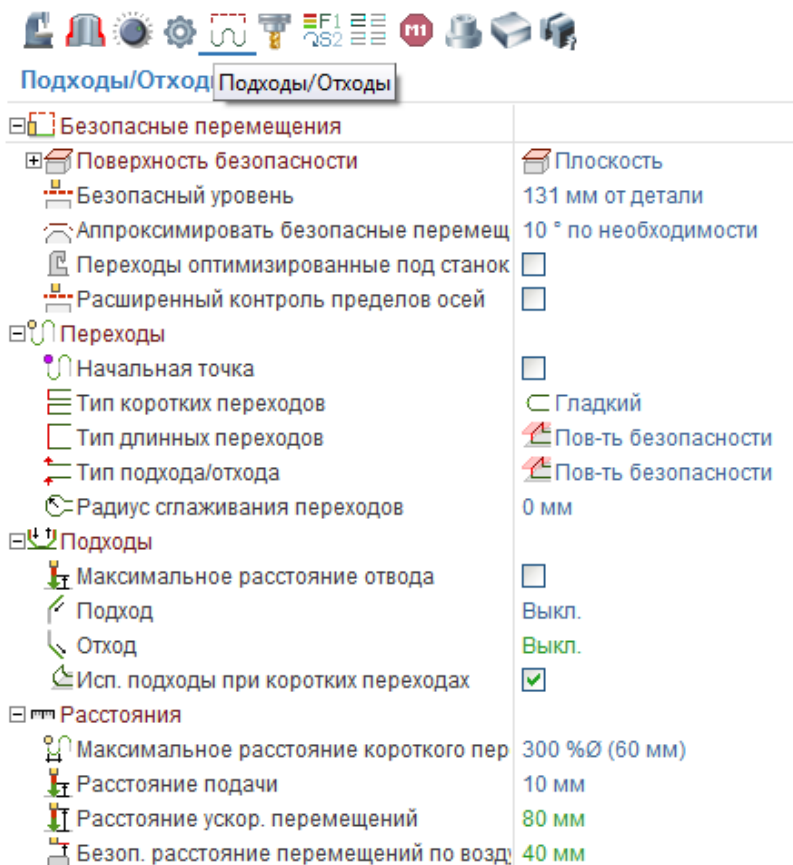


Рис. 34. Меню «Подходы/Отходы»

В этом же разделе задаются параметры моделирования, которые позволяют контролировать зарезы инструмента в заготовку и столкновение инструмента с деталью.

В разделе подходы/отходы устанавливается безопасное расстояние, на которое перемещается инструмент в начале или окончании операции типа хода инструмента (рис. 34). Количество и набор задаваемых подач зависит от типа операции, так как устанавливаются подачи лишь для тех типов ходов, которые могут присутствовать в траектории инструмента этой операции. В этом же разделе выбирается тип коротких, длинных переходов и подхода/отхода инструмента в зависимости от типа операции.

ID	Название	M#	Тип инструмента	D	R	L	Исто...
22	16mm Spherical mill	22 0	Сферическая фреза	16	8	64	Библ...
23	18mm Spherical mill	23 0	Сферическая фреза	18	9	72	Библ...
23	18mm Spherical mill	23 0	Коническая фреза	15.9	7	72	Про...
	Черновая послышная	23 0	Коническая фреза	15.9	7	72	Проект
	5D по поверхностям	23 0	Коническая фреза	15.9	7	72	Проект
	5D по поверхностям2	23 0	Цилиндрическая фреза	20	0	70	Про...
	5D по поверхностям3	23 0	Коническая фреза	15.9	7	72	Проект
	3D Спираль	23 0	Коническая фреза	15.9	7	72	Проект
24	20mm Spherical mill	24 0	Сферическая фреза	20	10	80	Библ...
25	25mm Spherical mill	25 0	Сферическая фреза	25	12.5	100	Библ...
26	30mm Spherical mill	26 0	Сферическая фреза	30	15	120	Библ...
27	Ø5 R0.5 mm Torus mill	27 0	Торондальная фреза	5	0.5	17.5	Библ...

Рис. 35. Библиотека инструментов

Расчет траектории производится на настроечную точку инструмента. Параметры инструментов устанавливаются в окне параметров операции на странице «Инструмент» или в окне инспектора свойств операций. В разделе «Инструмент» можно подобрать необходимый для обработки инструмент как с помощью специ-

альной библиотеки (рис. 35), в которой будет прописан тип и размеры, а так же вручную (рис. 36). Помимо выбора инструмента можно изменить параметры наладки на оборудование выбранного инструмента, задать точку контакта и выбрать оправку.

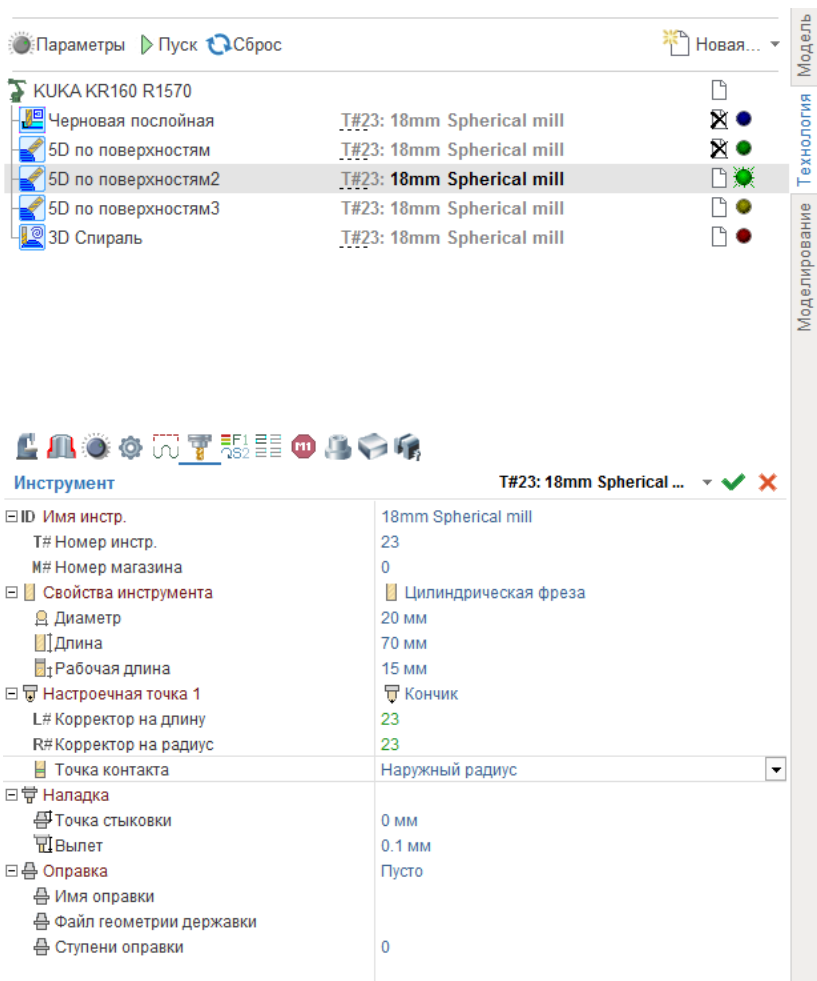


Рис. 36. Меню «Инструмент»

После того как были выбраны все технологические параметры, определено что и каким образом будет обрабатываться, проводится моделирование полученных результатов.

6.2.3 Моделирование траектории движения деформирующего инструмента

Система имеет встроенные средства многокоординатного моделирования обработки, в свою очередь, даёт возможность получать реалистичное изображение и проверить достоверность результатов разработанной траектории обработки деталей. Переход в режим моделирования осуществляется нажатием на закладку «Моделирование» (рис. 37).

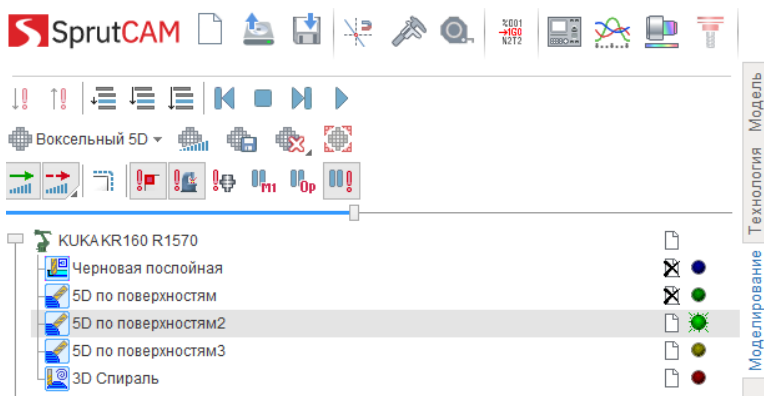


Рис. 37. Меню «Моделирование»

В режиме моделирования обеспечивается доступ к траектории перемещения инструмента (CLDATA) каждой операции технологического процесса. Если операция рассчитана, то результат расчета представляется в виде последовательности технологических команд CLDATA. Технологические команды CLDATA представ-

Строчка уже содержит в себе элементарные команды типа «GOTO» и т.д. Таким образом, сложная траектория может быть рассмотрена по логическим частям, проанализирована и, если необходимо, отредактирована.

При перерасчете траектории после редактирования внесенные изменения не сохраняются. Окно редактирования параметров текущей команды открывается по двойному щелчку мышью на команде, либо через пункт «Редактировать» во всплывающем меню.

Траектория операции может быть трансформирована целиком. Для этого необходимо нажать правую кнопку мыши на нужной операции и в открывшемся меню выбрать пункт «Преобразование траектории» (рис. 39). Задание параметров в открывшемся окне совпадает с преобразованием геометрической модели.

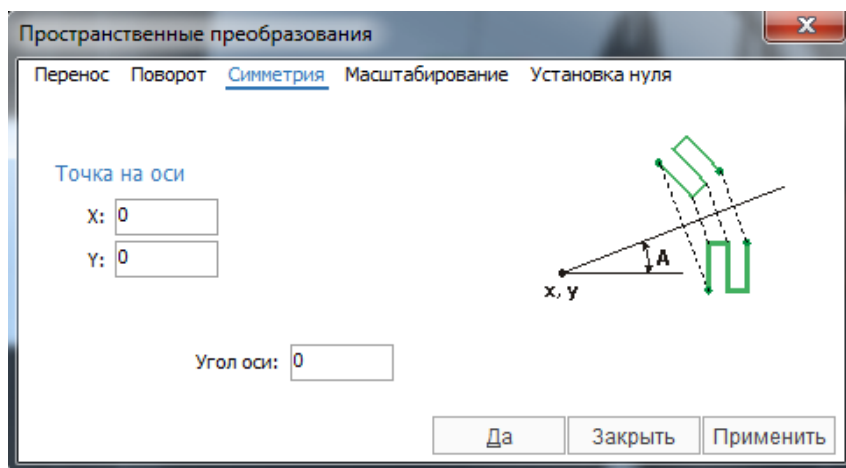


Рис. 39. Окно изменения траектории операции

При первом входе в режим моделирования, автоматически создается модель заготовки для обработки. При повторном входе обрабатываемая деталь не изменяется. То есть, результаты моде-

лирования сохраняются, и эмуляция обработки может быть продолжена. Для сброса результатов моделирования достаточно нажать кнопку «Сброс» (рис. 40). При этом заготовка будет заново проинициализирована в соответствии с параметрами, заданными в корневом узле технологического процесса.



Рис. 40. Меню управления моделированием

Так же в этом меню производится запуски и остановка моделирования, производится моделирование в обратном порядке и моделирование выбранного узла (то есть при переходе на следующий узел моделирование приостанавливается). Окно экспорта результатов моделирования открывается нажатием кнопки в окне моделирования обработки либо из «Основного меню». В данном окне будет предложено ввести имя экспортируемого файла в формате STL. В дальнейшем полученный результат можно будет использовать для импорта геометрической модели, например в качестве заготовки для использования в другом проекте, либо в любой другой программе, поддерживающей импорт данного формата.

Убедившись в правильности построения траектории движения деформирующего инструмента, необходимо сохранить алгоритм в формате, который используется на оборудовании. Для этого возвращаемся на вкладку «Технология» и на панели инструментов данного окна выбираем раздел «Постпроцессор» (рис. 41).

Выбранный раздел представлен в виде трех столбцов. В первом расположен каталог с файлами постпроцессоров различных обрабатывающих машин, разработанных компанией SprutCAM. Во втором столбце показаны все имеющиеся операции разработанные пользователем. В третьем столбце находится окно для генерирования управляющей программы. После выбора нужных параметров в каждом из столбцов, кнопка запуска генерации станет активной и файл сохранится в указанную выше папку. Этот файл можно использовать для задания траектории соответствующего оборудования для которого он был сгенерирован.

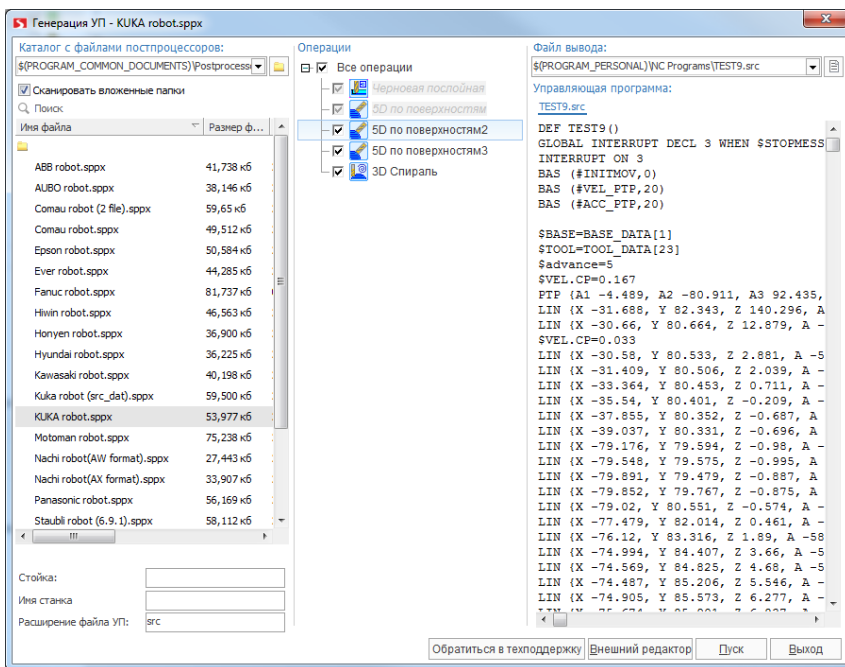


Рис. 41. Генерация управляющей программы

6.3 Методика построения траектории при движении деформирующего инструмента по спирали

Построение маршрута движения по спирали начинается аналогично пункту 7.2.1 с импорта геометрии и отличается только траекторией движения, которая задается с помощью технологической операции «3D Спираль» в SprutCAM.

После выбора операции автоматически переходим в меню наладки используемого оборудования. Если заготовка и инструмент не менялись, то основные параметры, к которым можно отнести расположение коннектора заготовки, установ (связь между системой координат станка с системой координат геометрии) и система координат заготовки, можно оставить без изменения.

Следующим шагом является выбор обрабатываемых поверхностей и рабочей зоны в разделе «Рабочее задание» (рис. 42).

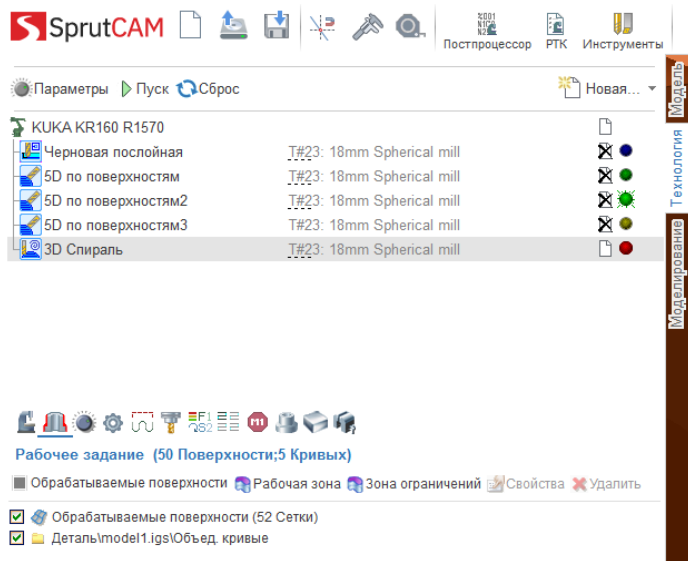


Рис. 42. Меню выбора рабочей зоны

Стоит отметить, что, если в импортированной геометрии есть области которые не нужно обрабатывать с помощью выбранной операции, то есть возможность выделить ее как зону ограничения.

Далее в разделе «Стратегия» (рис. 43) задается шаг спирали (вертикальное расстояние между соседними витками спирали (рис. 44) в зависимости от необходимой точности получаемой детали и выбранного инструмента обработки.

В этом же разделе задаются уровни обработки (рис. 45) в противном случае будет обрабатываться вся деталь, а так же позиция с которой начинается обработка (сверху или снизу).

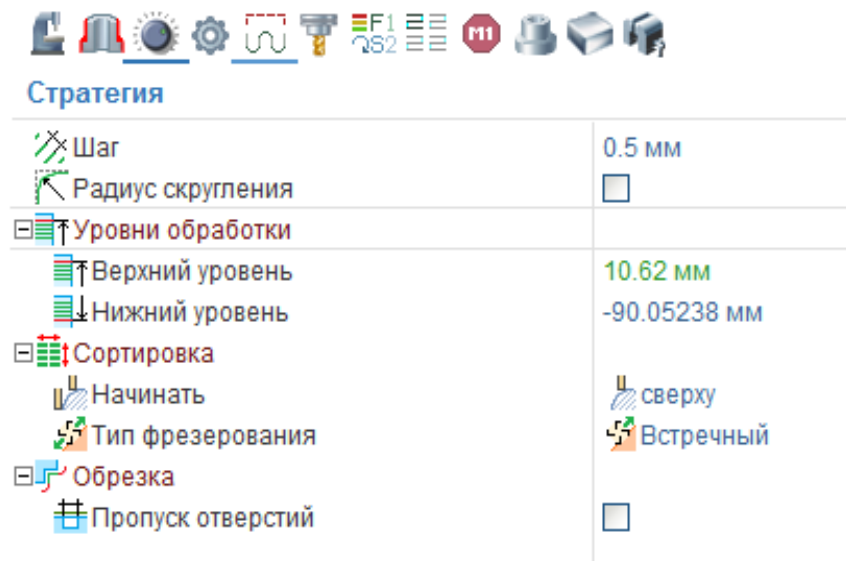


Рис. 43. Меню «Стратегия»

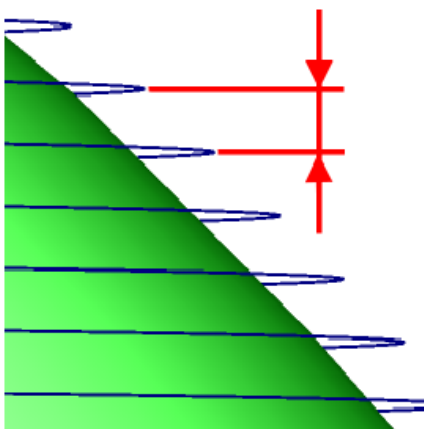


Рис. 44. Шаг спирали

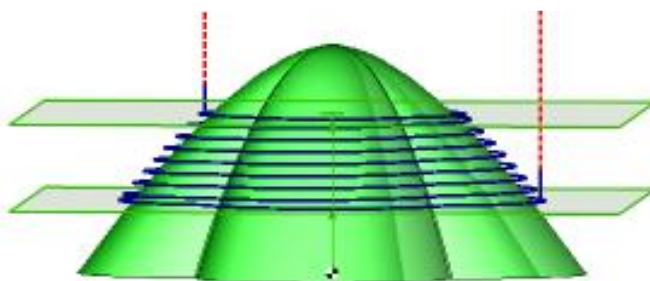


Рис. 45. Уровни обработки

В меню дополнительных параметров выбирается точность позиционирования инструмента и, при необходимости, припуск на получаемую деталь. В этом же разделе задаются параметры моделирования, которые позволяют контролировать зарезы инструмента в заготовку и столкновение инструмента с деталью (рис. 46).



Параметры

Контролировать модель	<input checked="" type="checkbox"/>
Точность	0.02 мм
Припуск	0 мм
Интерполяция дугами	<input type="checkbox"/>
Контроль державки	<input type="checkbox"/>
Вывод	
Макс. длина перемещения	<input type="checkbox"/>
Моделирование	
Контроль зарезов	<input checked="" type="checkbox"/>
Тип моделирования	Авто
Удалять остатки	<input type="checkbox"/>
Контролировать столкновения с деталью	<input checked="" type="checkbox"/>

Рис. 46. Меню дополнительных параметров

Задание параметров траектории подходов и отходов, а так же выбор инструмента осуществляются аналогично операции описанной выше в пункте 7.2.2. После того как были заданы все необходимые параметры, производится расчет траектории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование технологии инкрементального формообразования в отличие от других способов листовой штамповки позволяет значительно уменьшить количество переходов при производстве изделий сложной формы, за счет повышения предельных деформационных возможностей заготовки, а также сократить время требуемое для проектирования и производства оснастки. Применение технологии инкрементального формообразования возможно и для быстрого прототипирования изделий, например, для их последующего испытания.

Технологии инкрементального формообразования 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 твердого тела, теории пластичности, теории обработки металлов давлением, практически отсутствуют. Очевидно, что это связано с особенностью процесса- отсутствием деформирующего инструмента, форма которого определяет конечную геометрию изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. С. 84-89.

2. 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, vol. 210, issue 11, pp. 1501–1510.

3. Tisza M., Paniti I., Kovács P. Z. (2010): Experimental and Numerical Study of a Milling Machine-based Dieless Incremental Sheet Forming, *International Journal of Material Forming*, Volume 3, Supplement 1, pp. 441-446.

4. Marabuto S., Afonso D., Ferreira J., Melo F., Martins M.A., de Sousa R. Finding the Best Machine for SPIF Operations-a Brief Discussion, in: *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publ, 2011, pp. 861-868.

5. Verbert J., Aerens R., Vanhove H., Aertbeliën E., Dufloy J.R. Obtainable accuracies and compensation strategies for robot supported spif, *Key Engineering Materials*, *Key Engineering Materials*, 410 (2009) 679-687.

6. Portman V.T. Stiffness evaluation of machines and robots: minimum collinear stiffness value approach, *Journal of Mechanisms and Robotics*, 3(2011) 011015.

7. T. Schafer, R.D. Schraft, Incremental sheet metal forming by industrial robots, *Rapid Prototyping Journal*, 11 (2005) 278-286.

8. Dufloy J.R., Callebaut B., Verbert J., Baerdemaeker H. De. Laser assisted incremental forming: Formability and accuracy improvement, *Cirp Ann-Manuf Techn*, 56 (2007) 273-276.

9. Meier H., Dewald O., Zhang J. A new robot-based sheet metal forming process, in: *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ, 2005, pp. 465-470.

10. Lamminen L. Incremental Sheet Forming with an Industrial Robot–Forming Limits and Their Effect on Component Design, *Advanced Materials Research*, 6 (2005) 457-464.
11. 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) 493-514.
12. Emmens WC; Sebastiani G; van den Boogaard, AH (2010): The Technology of Incremental Sheet Forming - a Brief Review of the History, *J. of Material Processing Technology* 210(8):981-997, doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.02.014.
13. Jeswiet J., Micari F., Hirt G., Bramley A., Duflou J., Allwood J. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal, *Cirp Ann-Manuf Techn*, 54 (2005) 623-649.
14. Gutierrez Pedro Pablo Rodriguez, Rastroero Maria Asuncion Rivero, Onandia Elixabete Maidagan (2008): Machine for Shaping Sheet Metal and Shaping Method, PCT Patent EP1977842.
15. Carl Frederick Johnson, Vijitha Senaka Kiridena, Feng Ren, Zhiyong Cedric Xia (2012): System and Method for Incrementally Forming a Workpiece, US Patent US 8322176.
16. Cao J., Xia Z. C., Gutowski T. G., and Roth J. “A Hybrid Forming System: Electrical-Assisted Double Side Incremental Forming (EADSIF) Process for Enhanced Formability and Geometrical Flexibility,” Northwestern University, Document ID: DE-EE0003460, 2012.
17. Allwood J., Houghton N., Jackson K. The design of an incremental sheet forming machine, *Advanced Materials Research*, 6 (2005) 471-478.
18. Okada N., Ro G., Suzuki Y. Method and apparatus for incremental forming, in, US Patent 6,971,256 B2, 2005.
19. Shima Akio, Yoshikawa Takenao, Nakamura Keiichi, Sudo Yoichi, Suzuki Shoji (1997): Formation of Successively Expanding Metallic Plate and Apparatus Therefor, Japanese Patent JP09-085355.

20. Franzen V., Kwiatkowski L., Sebastiani G., Shankar R., Tekkaya A. E., Kleiner M. (2008): Dyna-Die: Towards Full Kinematic Incremental Forming, Proceedings Esaform, Lyon, France, April 23-25 2008, paper #302.

21. Yongjun Wang, Ying Huang, Jian Cao (2008): Experimental Study on a New Method of Double Side Incremental Forming, in the Proceedings of ASME 2008 Conference, October 7-10, 2008, Evanston, Illinois, USA, pp. 601-607.

22. Method and device for forming metal plate; Shigeo Matsubara; Filed 11-11-1993, Issued 23-05-1995. JP 07-132329.

23. Apparatus for dieless forming plate materials; Shigeo Matsubara, Hiroyuki Amino*, Susumu Aoyama*, Yan Lu* (*Amino Corporation); Filed 29-01-1999, Issued 12-01-2000. EP 0970764 A1.

24. Shim M-S, Park J-J. The formability of aluminum sheet in incremental forming // J Mater Process Technol. 2001. №113. P. 654-8.

25. Park J-J, Kim Y-H. Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique // J Mater Process Technol. 2003. №140. P. 447-53.

26. Томленов А.М. Теория пластического деформирования металлов. Москва: Металлургия, 1972. 408 с.

27. Пластичность и разрушение / В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов, Б.А. Мигачев [и др.]; Под науч. ред. В.Л. Колмогорова. Москва: Металлургия, 1977. 336 с.

28. Filice L, Fratini L, Micari F. Analysis of material formability in incremental forming // CIRP Ann-Manuf Technol. 2002. №51. P. 199-202.

29. Jackson K, Allwood J. The mechanics of incremental sheet forming // J Mater Process Technol. 2009. №209. P. 1158-74.

30. Malhotra R, Xue L, Belytschko T, Cao J. Mechanics of fracture in single point incremental forming // J Mater Process Technol, 2012, №212. 1573-90.

31. Young D, Jeswiet J. Wall thickness variations in single-point incremental forming // Proc Inst Mech Eng Part B: J Eng Manuf. 2004. №218:1453-9.

32. Kim T, Yang D. Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process // *Int J Mech Sci.* 2000. №42:1271–86.
33. Emmens W, Van den Boogaard A. An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming // *J Mater Process Technol.* 2009. №209:3688–95.
34. Eyckens P, Belkassem B, Henrard C, Gu J, Sol H, Habraken AM, Duflou JR, Van Bael A, Van Houtte P. Strain evolution in the single point incremental forming process: digital image correlation measurement and finite element prediction // *Int J Mater Form.* 2011. №4:55–71.
35. 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. №27. P. 1577-1597.
36. 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 // *Proceedings of the 9th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes NUMIFORM'07.* AIP Publishing. 2007. P. 141-146.
37. 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 // *Int J Mater Form.* 2009. №2. P. 379-382.
38. 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 // *Int J Mater Form.* 2008. №1. P. 1159-1162.
39. Allwood J., Shouler D. Generalised forming limit diagrams showing increased forming limits with non-planar stress states // *Int J Plast.* 2009. №25. P. 1207–30.
40. Emmens W., Van den Boogaard A. Incremental forming by continuous bending under tension—an experimental investigation // *J Mater Process Technol.* 2009. №209. P. 5456–63.

41. Silva M., Skjødt M., Martins P.A., Bay N. Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008. №48. P. 73-83.

42. Martins P., Bay N., Skjødt M., Silva M. Theory of single point incremental forming // *Cirp Ann-Manuf Techn*. 2008. №57. P. 247-252.

43. Eyckens P. Formability in Incremental Sheet Forming: Generalization of the Marciniak-Kuczynski Model. PhD Thesis. KU Leuven. Leuven. 2010.

44. Hussain G., Gao L., Hayat N., Ziran X. A new formability indicator in single point incremental forming // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. 209. P. 4237-4242.

45. 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. №219. P. 359-364.

46. Verbert J. Computer Aided Process Planning for Rapid Prototyping With Incremental Sheet Forming Techniques, PhD Thesis. Katholieke Universiteit Leuven. Leuven. 2010.

47. 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. №47. P. 2177-2181.

48. Behera A.K. Shape Feature Taxonomy Development for Tool-path Optimisation in Incremental Sheet Forming. PhD Thesis. Katholieke Universiteit Leuven. 2013.

49. Filice L., Ambrogio G., Micari F. On-line control of single point incremental forming operations through punch force monitoring // *Cirp Ann-Manuf Techn*. 2006. №55. P. 245-248.

50. Aerens R., Eyckens P., Van Bael A., Duflou J. Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations // *Int J Adv Manuf Technol*. 2010. №46. P. 969-982.

51. Szekeres A., Ham M., Jeswiet J. Force measurement in pyramid shaped parts with a spindle mounted force sensor // *Key Engineering Materials*. 2007. №344. P. 551-558.

52. Emmens W.C. A. Van den Boogaard, Strain in shear, and material behaviour in incremental forming // *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publ. 2007. №344. P. 519-526.

53. 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 // *Mater Design*. 2014. №63. P. 20-29.

54. Lu B. Investigation of material deformation mechanism in double side incremental sheet forming // *Int J Mach Tools Manuf*. 2015. №93. P. 37-48.

55. 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*, EDP Sciences. 2015. №04013.

56. Silva M., Nielsen P., Bay N., Martins P. Failure mechanisms in single-point incremental forming of metals // *Int J Adv Manuf Technol*. 2011. №56. P. 893-903.

Учебное издание

*Сурудин Сергей Викторович,
Черников Дмитрий Геннадьевич*

**ОСНОВЫ ПРОЦЕССА
ИНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ**

Учебное пособие

Редакционно-издательская обработка
издательства Самарского университета

Подписано в печать 11.12.2025. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 4,75.

Тираж 120 экз. (1-й з-д 1-27). Заказ № 18 . Арт. – 38(Р2УП)/2025.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.