

УДК 621.7. 044

**Изготовление листовых окантовок люков летательных аппаратов магнитно-импульсным способом и моделирование с использованием САПР**

**Астапов В.Ю.\***, **Хорошко Л.Л.\*\***, **Джоздани М.С.\*\*\***, **Хорошко А.Л.\*\*\*\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\*e-mail: [vikas53@yandex.ru](mailto:vikas53@yandex.ru)*

*\*\* e-mail: [khoshko@mati.ru](mailto:khoshko@mati.ru)*

*\*\*\* e-mail: [sjozdani@gmail.com](mailto:sjozdani@gmail.com)*

*\*\*\*\* e-mail: [lesha065@mail.ru](mailto:lesha065@mail.ru)*

**Аннотация**

Статья посвящена актуальной проблеме – определению оптимальных режимов воздействия деформирующего усилия, необходимого при отработке технологии формообразования сложного профиля конструкций окантовок деформированием листовой заготовки давлением импульсного магнитного поля, а также моделированию этого процесса. Процесс магнитно-импульсной штамповки позволяет концентрировать деформирующее листовую заготовку воздействие в заданных параметрах и в требуемой зоне, но требует тщательной отработки технологических режимов. Разработаны рекомендации по определению требуемых энергосиловых параметров процесса формообразования листовых заготовок, обеспечивающие максимальную эффективность процесса, что сокращает число технологических операций,

сложность и сроки изготовления оснастки и эксплуатации оборудования. Моделировалось перемещение образца и его деформирование по матрицам, имеющим различные формы профилей.

**Ключевые слова:** листовые окантовки замкнутой формы, сложные переходные профили, магнитно-импульсное деформирование, высокоскоростное пластическое формообразование, системы автоматизированного проектирования, твердотельная модель, трехмерное моделирование.

## Введение

При проектировании деталей конструктору важно знать технические возможности заготовительно-штамповочного производства и ориентироваться на наиболее современные технологические процессы их изготовления. В том числе какое-то количество применяемых в конструкции самолета деталей составляют детали из листовых материалов, используемые в качестве окантовок. Наиболее характерными деталями этого типа являются различные окантовки люков, лючков, смотровых окон и жесткостей панелей, диафрагмы, жесткости. Общим для таких деталей является наличие стенки, бортов, и различных элементов, повышающих жесткость, уменьшающих массу. Эти листовые детали представляют собой сложные, в основном замкнутые формы, изготовление которых методами пластического деформирования требует достаточно сложной штамповочной оснастки. Классические технологические способы изготовления имеет определенные недостатки, связанные с

необходимостью доработки формообразования. Кроме того, частое обновление конструкций изделий и их постоянное совершенствование при значительном объеме опытного и мелкосерийного производства потребовало создания технологических методов, которые обеспечивают существенное сокращение сроков подготовки

### **Окантовки люков**

Большое количество используемых в самолете деталей составляют детали каркаса из листовых материалов. Общим для таких деталей является наличие стенки, бортов и различных элементов, повышающих жесткость и уменьшающих массу. Наиболее характерными деталями этого типа являются нервюры, диафрагмы, жесткости, различные окантовки. Эти листовые детали представляют собой сложные, в основном замкнутые формы, изготовление которых методами пластического деформирования требует достаточно сложной штамповочной оснастки. Основными методами их изготовления являются штамповка с использованием оснастки в виде формблоков, штампов, эластичных и гидроэластичных сред [1]. По форме поверхности окантовки могут быть плоскими, имеющими кривизну в одной плоскости, а также имеющими кривизну в двух плоскостях (рис. 1,а), они могут выполняются монолитными или могут иметь внутреннее отверстие различной формы (рис. 1,б). При проектировании технологических процессов изготовления подобных деталей необходимо учитывать не только способность материала удовлетворять эксплуатационным требованиям, но и его технологические свойства. Во-первых, материалы должны обладать хорошей штампуемостью (высокой

способностью к пластическому деформированию), и, во-вторых, удовлетворять конкретным требованиям данного технологического процесса – обеспечивать достаточную прочность изделия и не оказывать слишком высокого сопротивления в процессе обработки давлением [1]. Детали типа окантовок нашли широкое применение в производстве авиационной техники. Они применяются для усиления конструкции в зонах вырезов под люки, смотровые лючки, иллюминаторы, различные окна и других элементов, применяются также для усиления конструкций листового материала деталей типа люки или съемные панели небольших размеров. По конструктивной форме окантовки и жесткости представляют собой листовые детали, в которых выполнены переходные поверхности, различной глубины и различной формы, как показано на рис. 2. Подобные детали применяются и в конструкциях другой техники.

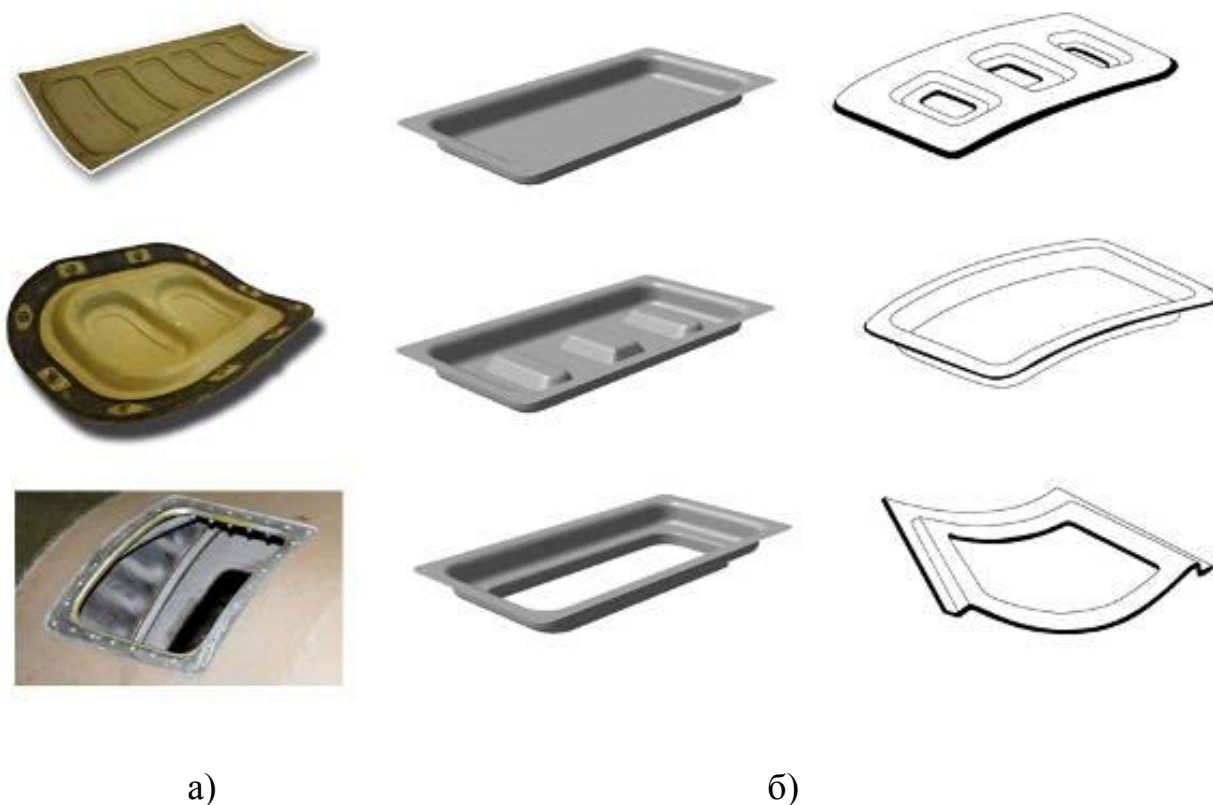


Рис.1. Типовые детали: общий вид (а) и варианты внутреннего контура (б)

Типовые сечения профилей деталей позволяют определить следующие формы и диапазоны размеров, представленные на рис.2: неглубокое расстояние от исходной верхней плоскости или поверхности до плоскости или поверхности на другом уровне (рис. 2.а), составляющее до 4...5 мм; среднее значение глубины переходной поверхности до 8...10 мм (рис.2,б) и значительное расстояние, составляющее до 14...18 мм (рис.2,в). Изготовление окантовок осуществляется разными методами, такими как штамповка на листоштамповочных (падающих) молотах, на прессах эластичным пуансоном

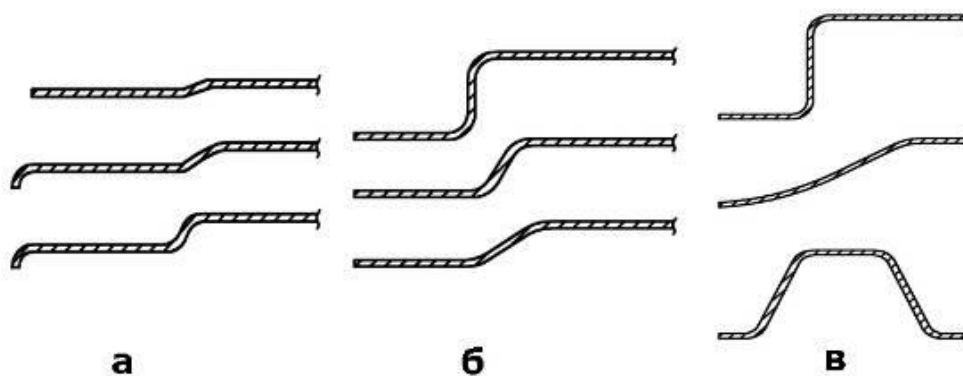


Рис.2. Типовые профили переходных частей

или жидкой средой, пневмотермической формовкой и другими методами. При этом в заготовительно-штамповочных цехах на долю доводочных работ после штамповки приходится до 30...40 % [2]. В какой-то мере снизить долю доводочных работ позволяют импульсные методы штамповки, основанные на инерционном варианте деформирования листовых заготовок после придания им заданного импульса, одним из которых является магнитно-импульсная обработка металлов, использующая эффект создания давления на заготовку

через магнитное поле, возникающее при прохождении импульсного тока по инструменту - индуктору [3].

### Теоретический расчет

Расчет режимов магнитно-импульсной обработки представляется весьма сложным, так как необходимо учитывать и механические и электрические характеристики металлов, и электрические параметры установки, инструмента и параметры оснастки. При этом удобно для упрощения реальную эпюру давления импульсного магнитного поля (ИМП) целесообразно привести к эквивалентной (рис.3). Естественным условием такого приведения должно быть равенство работ эквивалентного и реального давлений [3]. Выбор оптимального режима обработки деталей состоит из электрического и механического расчетов и выбора оптимального электромеханического режима на их базе.

В нашем случае используется предложенная следующая форма записи давления с учетом перемещения заготовки [3]:

$$P(u, t) = P_0 \frac{\Delta}{\Delta + u} e^{-\beta t} \sin^2 \omega t \quad (1)$$

где: где:  $P_0$  - условное давление, существовавшее бы при  $t=0$  и  $U=0$ ;

$\beta$ - коэффициент затухания тока разряда;

$\omega$ - круговая частота колебаний разрядного тока

$\Delta$  - зазор между индуктором и заготовкой.

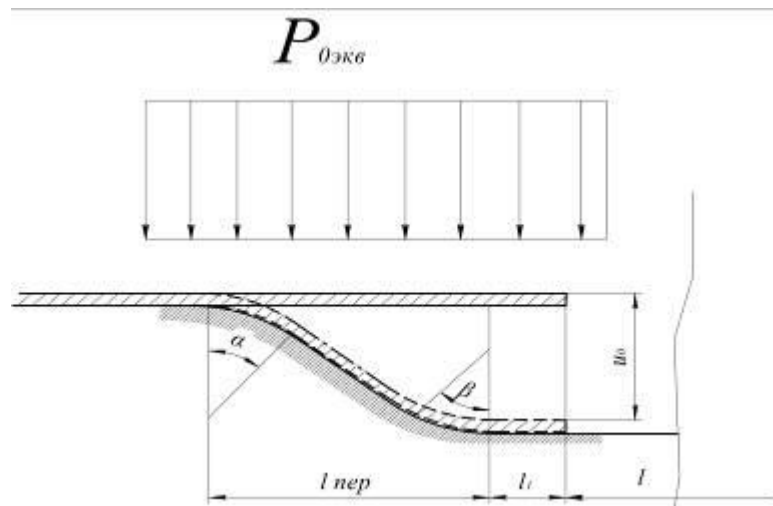


Рис. 3. К приведению реальной эпюры давления ИМП к эквивалентной  
прямоугольной

Итоговое уравнение движения после введения безразмерных коэффициентов примет вид

$$\frac{d^2 \varepsilon}{d\tau^2} + \frac{\operatorname{arctg}[b \ln(1 + \varepsilon)]}{(1 - \varepsilon)[1 + N(1 - \varepsilon)]} + \frac{f(1 - \varepsilon)(\varepsilon - h_1)}{(1 + h_1)^2 [1 + N(1 - \varepsilon)]} = \frac{m h e^{-\alpha \Omega \tau} \sin^2 \Omega \tau}{(\varepsilon + h)[1 + N(1 - \varepsilon)]} (1 - \varepsilon) \quad (2)$$

$$f = \frac{Er}{a\delta} \frac{1,19 + 1,48\mu}{1 - \mu^2} \text{ — безразмерная жесткость матрицы;}$$

$$N = \frac{\rho r}{\rho_0 \delta} \frac{1,19 + 1,48\mu}{(1,84 + 0,65\mu)^2} \text{ — безразмерные масса матрицы;}$$

$E$ ,  $\mu$ ,  $\rho$  и  $\delta$  - модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность заготовки и ее толщина;

$$h_1 = \frac{\Delta}{u} \text{ — безразмерный эквивалентный зазор между заготовкой и матрицей;}$$

$$\tau = t \sqrt{\frac{\alpha}{\rho r^2}} \text{ — безразмерное время;}$$

$$m = \frac{P_0 r}{\alpha \delta} \text{ — безразмерное давление;}$$

$$\Omega = \omega \sqrt{\frac{\rho r^2}{a}} \text{ — безразмерная частота тока;}$$

$\varepsilon = \frac{u(t)}{h}$  - деформация внутреннего слоя листовой заготовки;

$c = \frac{\beta}{\omega}$  — безразмерный коэффициент затухания.

Выбор режима обработки деталей на имеющейся магнитно-импульсной установке состоит из механического и электрического расчета и выбора оптимального электромеханического режима на их базе.

Целью электрического расчета является:

1) установление возможности изготовления детали на данной установке (либо параметров установки, наиболее подходящей для изготовления данной детали

2) установление связи между частотой тока  $f$ , давлением  $p_0$  и энергией, запасаемой в магнитно-импульсной установке  $W_{co}$ .

3) определение коэффициента затухания или безразмерного коэффициента

$c = \frac{\beta}{f} = \frac{1}{Q_{u-3}}$ , где  $Q_{u-3}$  - добротность системы "индуктор-заготовка";

4) определение эквивалентного зазора между индуктором и заготовкой  $\Delta$ .

Целью выбора оптимального электромеханического режима является определение:

оптимальной частоты  $f_{opt}$ , при которой деформация достигается при минимальном расходе энергии;

число витков индуктора, обеспечивающих получение  $f_{opt}$ ;

энергии, потребной для обработки, и напряжение зарядки установки.



## **Экспериментальное определение и анализ изменения толщины стенки**

В качестве образцов использовались материала Д16Т, Д16М и АМГ6, наиболее часто применяемые для изготовления окантовок. Толщина образцов выбранного для экспериментов листового материала составляла от 1,0 до 2,0 мм. Углы наклона боковых поверхностей составляли 30, 45. 60 градусов, радиусы скруглений переходных поверхностей от 2 до 5 мм.

В процессе образования контура окантовок происходит деформирование материала и утонение толщины стенки листовой заготовки, которое необходимо установить, чтобы знать, как влияет магнитно-импульсное деформирование на качество деталей. Был проведен после деформирования замер толщин стенок деталей. Этот замер проводился в точках, показанных на рис. 4, для различных вариантов формы поверхностей окантовок. При этом точки поз. 5 устанавливались таким образом, чтобы в них деформации не происходило, остальные точки распределялись равномерно через одинаковые расстояния, а наибольшей деформации соответствовали точки поз.1, точки устанавливались равномерно с расстоянием между ними в 5-7 мм. Толщина стенки измерялась микрометром. По результатам замеров построены графики изменений толщины материала в указанных точках замеров (рис.5).

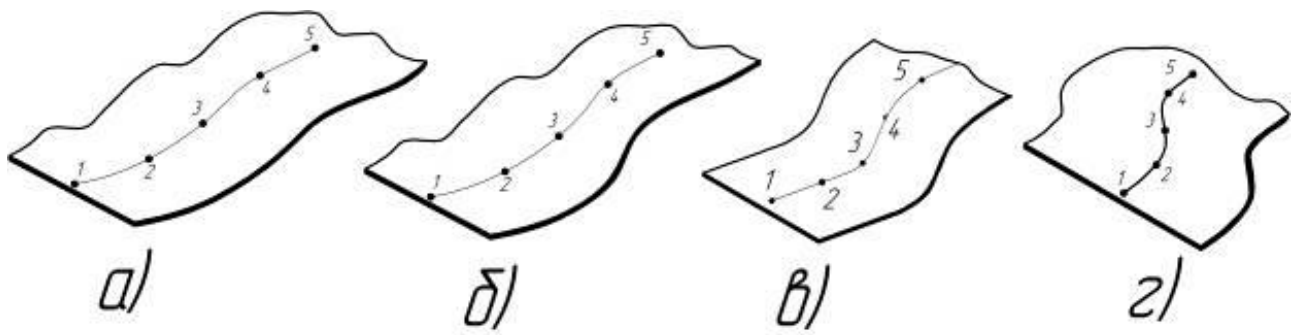
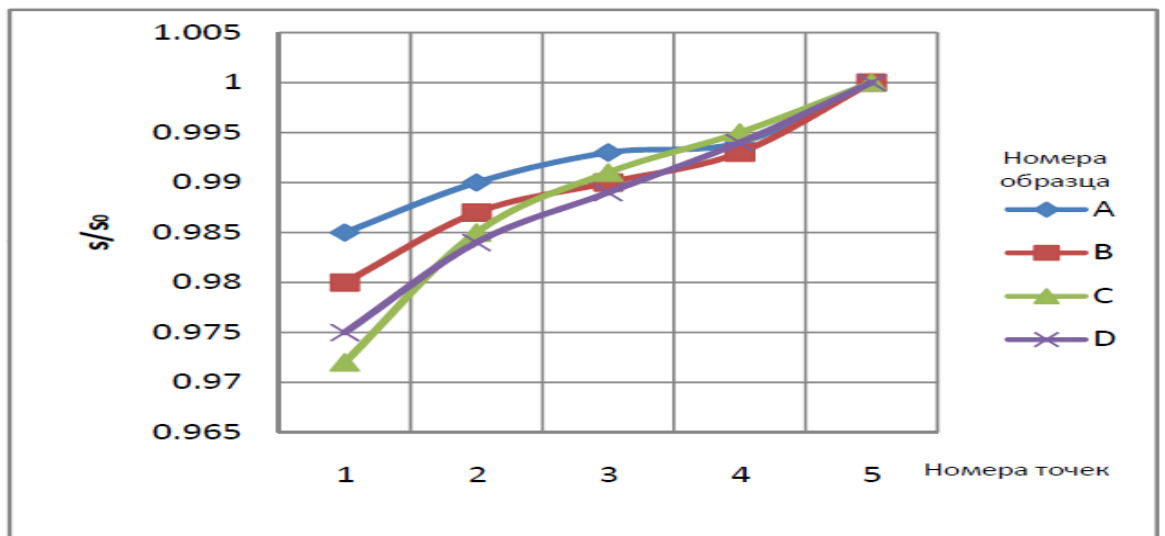
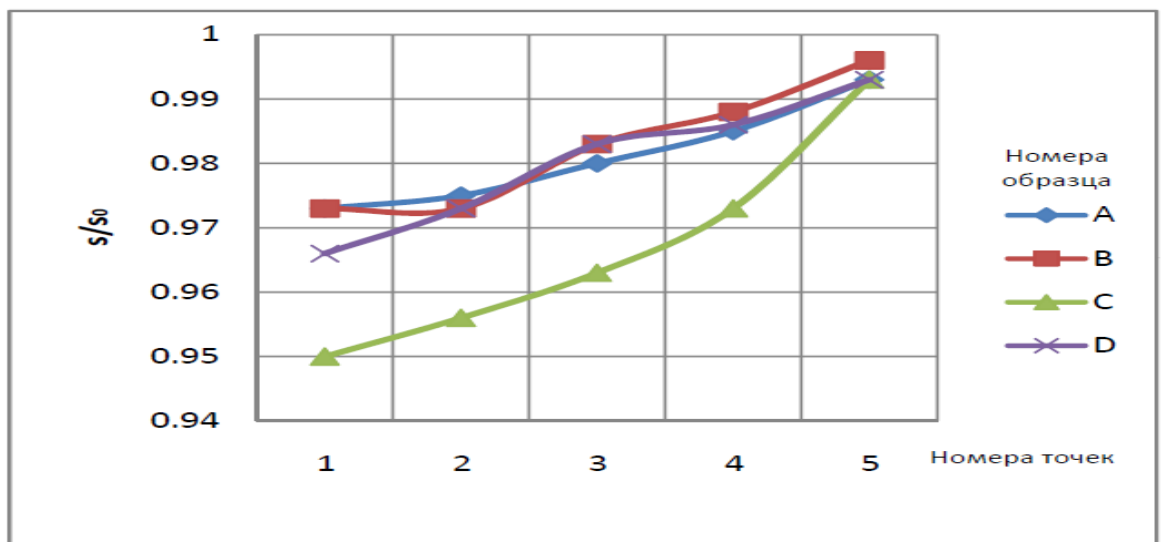


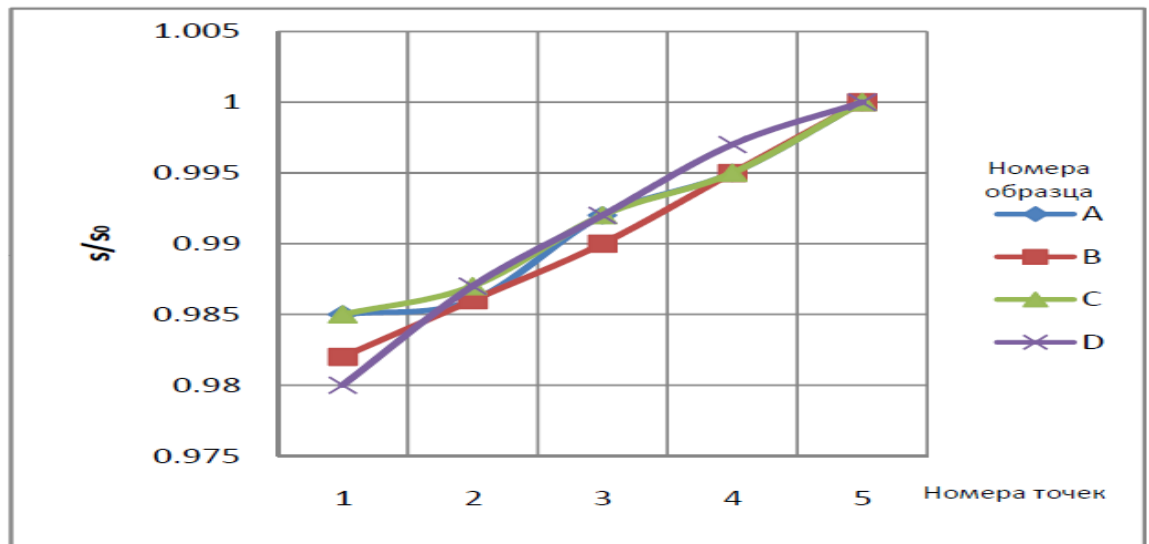
Рис. 4. Расположение точек замеров параметров на образцах



а)



б)



в)

Рис. 5. Изменение толщины стенки: а- исходная толщина 1,0 мм; б - исходная толщина 1,5 мм; в - исходная толщина 2,0 мм

Из данных замеров видно, что по мере увеличения деформации (от точек 5 к точкам 1) происходит некоторое утонение толщины стенки листовой заготовки, как и должно быть в этом случае формообразования, при этом наибольшее изменение происходит в переходных зонах, от недеформируемой зоны к торовой или конической. Это необходимо учитывать при проектировании конструкций и формы окантовок.

Для определения влияния магнитно-импульсного деформирования на характеристики твердости подвергаемых деформированию материалов и выявление изменений этих характеристик были проведены испытания по определению твердости деформированных образцов. Для этого были вырезаны участки образцов размерами 20x40 мм, которые были подготовлены соответствующим образом к проведению испытаний. После проведения предварительных испытаний были установлены следующие параметры,

связанные с особенностями тонкой стенки деталей и прочностью материала: тестовая нагрузка в 10 г, время приложения нагрузки 5 с. Замер параметров микротвердости производился на различных образцах в точках, указанных на рис.4. Определение микротвердости проводилось на оборудовании в ресурсном центре коллективного пользования «Авиационно-космические материалы и технологии» МАИ. Результаты измерений сведены в табл. 1, из которой видно, что по сравнению с исходными значениями в точках замеров 5 микротвердость повышается в максимально деформированной зоне в точках 1 на 18-30% для сплавов Д16Т, на 10-20% для сплавов Д16М. Причем подобное изменение характерно для всех исследуемых толщин 1,0 мм, 1,5 мм и 2,0 мм.

Таким образом, установлено, что с повышением степени деформирования листового материала возрастают прочностные свойства самого материала по сравнению с его исходными значениями. Это повышение связано с самим процессом деформирования, а также с упрочнением материала вследствие соударения листовой заготовки с инструментом – матрицами. При приложении магнитно-импульсного деформирования повышается поверхностная твердость, то есть, несколько повышается качество металла. Это также необходимо учитывать при проектировании окантовок и их изготовлению магнитно-импульсной обработкой металлов.

## Результаты замеров микротвердости образцов

N образца	S, мм	Материал	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5
1	1,0	Д16Т	660	660	570	470	460
2	1,0	Д16Т	640	590	570	520	510
3	1,0	Д16М	480	460	440	455	440
4	1,0	Д16М	450	450	440	440	440

N образца	S, мм	Материал	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5
1	1,5	Д16Т	560	530	510	460	490
2	1,5	Д16Т	550	510	500	490	490
3	1,5	Д16М	530	400	400	350	300
4	1,5	Д16М	310	310	300	300	300

N образца	S, мм	Материал	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5
1	2,0	Д16 М	385	370	370	350	350
2	2,0	Д16 М	360	335	330	320	290
3	2,0	Д16Т	580	520	500	470	460
4	2,0	Д16М	300	300	290	290	290

**Моделирование процесса формообразования поверхности деталей**

Для численного исследования и моделирования процесса магнитно-импульсного формообразования поверхностей окантовок была использована

программа ANSYS LS-DYNA — универсальная программная многоцелевая система конечно-элементного комплекса. Была разработана методика компьютерного моделирования, которая позволяет в соответствии требуемой геометрией поверхности матрицы и с выбранными схемами нагружения учитывать изменение нагрузки по деформируемой площади и задавать распределение интенсивности давления ИМП, варьировать геометрическими параметрами заготовок и характеристиками материала. Моделировалось перемещение образца и его деформирование по матрицам, имеющим различные формы профилей, фрагменты для одного из образцов по фиксированным интервалам времени показаны на рис. 6. Задавались параметры формы матрицы, характеристики и геометрические параметры материалов, энергетические параметры разрядного контура (давление ИМП). Из рисунка видно изменение цвета деформируемой части и по шкале соответствия можно определить перемещение стенки образца по времени

Затем были смоделированы сами матрицы с контурами и размерами поверхностей, соответствующими контурам реальных окантовок и смоделировано деформирование листовых заготовок под воздействием давления импульсного магнитного поля, по шкале цвета определялось перемещение по уровням.

Моделировалось перемещение образца и его деформирование по матрицам, имеющим различные формы профилей, фрагменты для одного из образцов по фиксированным интервалам времени показаны на рис.7. Задавались параметры формы матрицы, характеристики материалов и

геометрические параметры листовых заготовок, энергетические параметры разрядного контура (давление ИМП, его эпюра). Видно изменение цвета деформируемой части и по шкале соответствия можно определить перемещение стенки образца по времени, а также полученные данные кинематики движения можно сравнить с экспериментальным определением перемещения по результатам скоростной фотосъемки. Изменение цвета позволяет выявить это перемещение по времени и определить формообразование листового материала по поверхности матрицы, выявить точность прилегания, недоформовку в каких-либо местах или отскок от матрицы (рис. 6, 7). Для удобства можно выделить процесс деформирования только отдельно листовой заготовки, как показано на рис. 8.

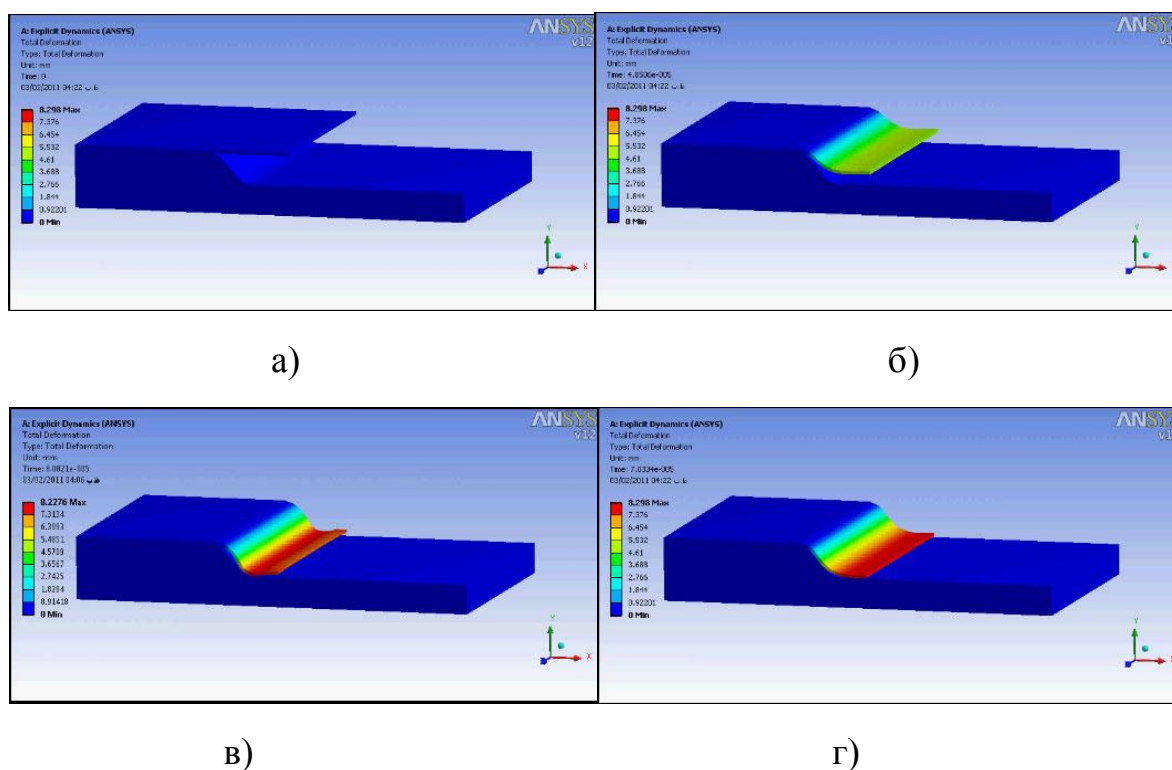


Рис. 6. Моделирование процесса перемещения образца листовой заготовки в фиксированные моменты времени

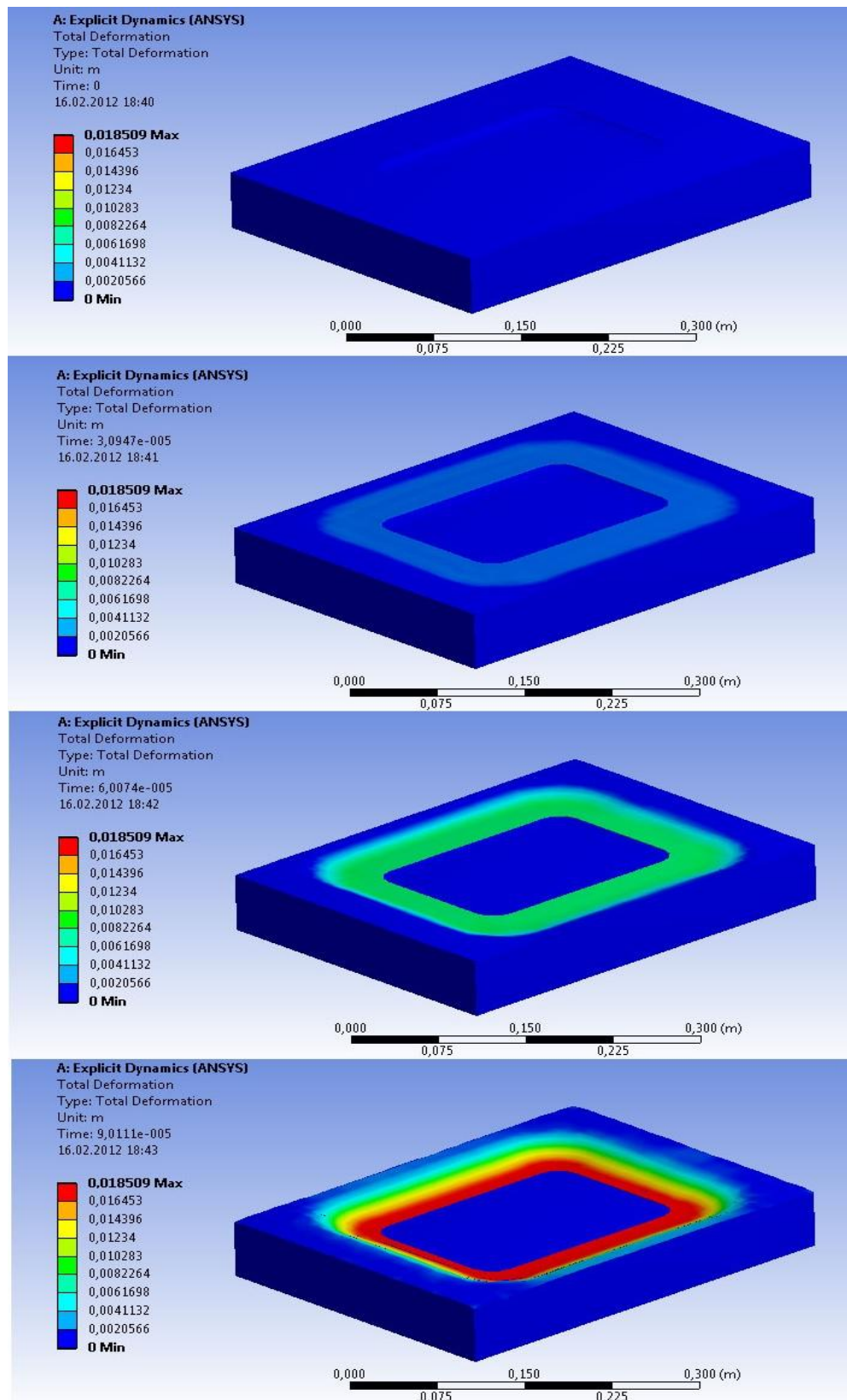


Рис. 7. Вариант моделирования формообразования с углом наклона  $45^\circ$



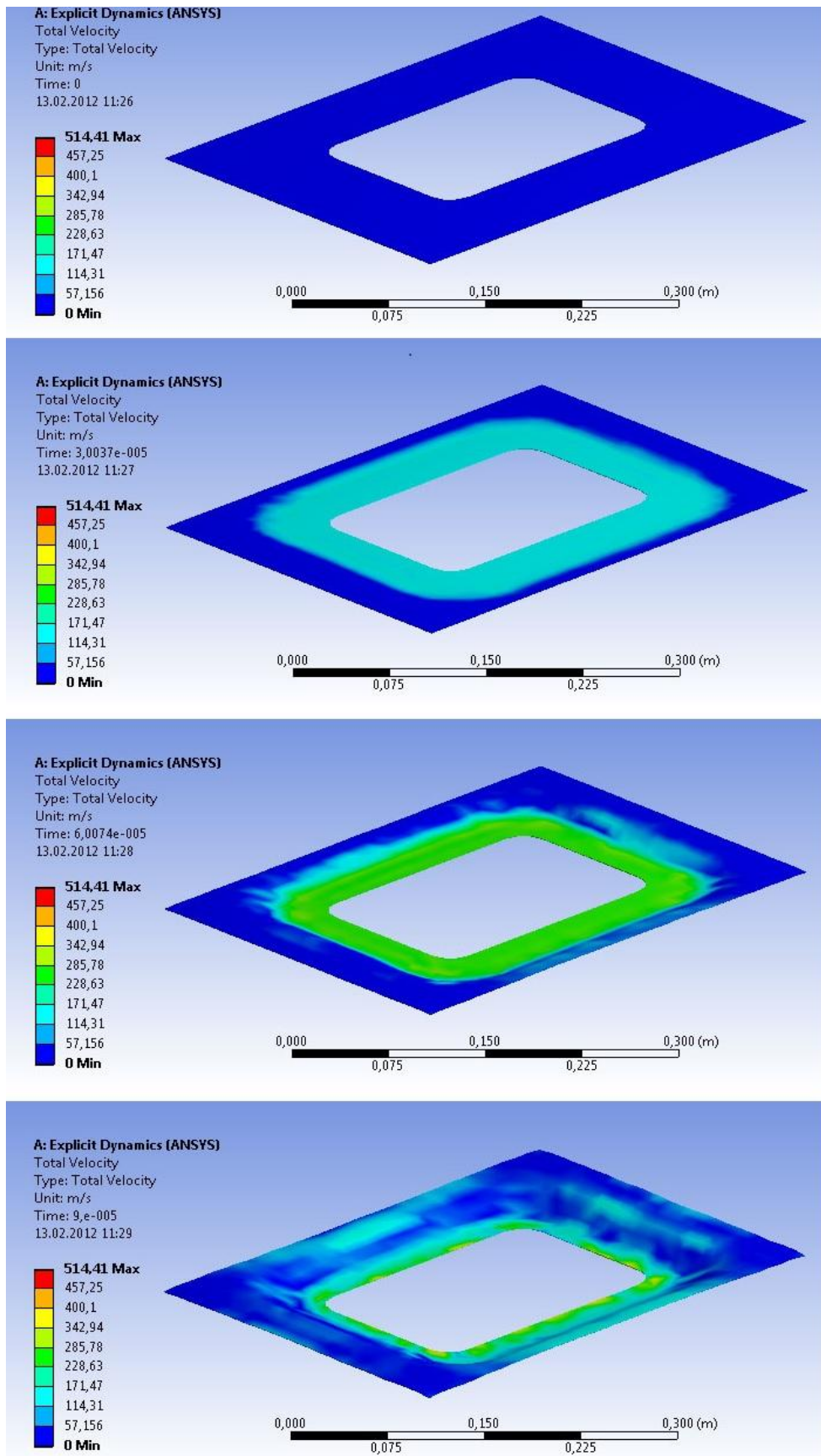


Рис. 8. Моделирование деформирования только заготовки

## Разработка технологии формообразования окантовок

Для разработки технологических процессов изготовления листовых деталей типа окантовок был изготовлен инструмент – плоский многовитковый индуктор, матрица и листовой материал. Плоский индуктор на технологическом столе показан на рис. 9. Общий вид магнитно-импульсной установки МИУ-3,5, на которой проводились некоторые эксперименты, показан на рис. 10.



Рис.9. Плоский индуктор



Рис. 10. Рабочий стол МИУ 4,5

Полученные детали представлены на рис. 11. На рис. 11,а в показана деталь, выполненная без внутреннего отверстия, а на рис. 11,б– деталь с предварительно пробитым внутренним отверстием.

В процессе проведения экспериментальных исследований возникло и сформировалось предложение, связанное с особенностью магнитно-импульсного формообразования поверхностей окантовок. Это связано с возможностью недоформовки поверхностей перехода, располагаемых перпендикулярно плоскости листовой заготовки или под углами, близкими в прямому. Было предложено выполнение магнитно-импульсного

формообразования в два этапа: на первом этапе на листовую заготовку с отверстием, установленную на матрице, воздействуют импульсным магнитным полем, при этом данное воздействие осуществляют вначале до образования боковой части профиля детали, после чего на втором этапе матрицу убирают, вставляют пуансон и продолжают воздействовать полем на полученную боковую стенку детали до принятия формы заготовкой уже по пуансону. Причем отбортовку боковой части профиля и обжим стенки осуществляют неравномерным импульсным магнитным полем с созданием большего давления со стороны кромки отверстия листовой заготовки. Этот вариант поясняется изображениями на рис. 12.

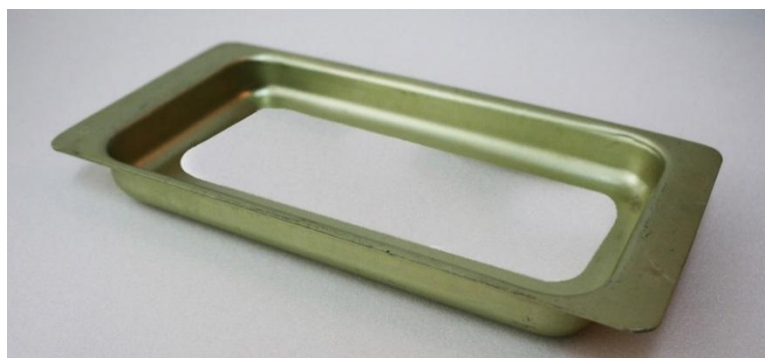


Рис. 11. Типовые варианты изготовленных окантовок

На листовую заготовку 2 воздействуют импульсным магнитным полем 3. Листовая заготовка 2 начинает под действием магнитного поля перемещаться и на этом этапе выполняется операция отбортовки листовой детали. Внутренняя кромка детали, там, где выполнено отверстие, перемещается на большую величину, чем остальная часть, прижатая к матрице, и в результате этого перемещения получается боковая стенка на листовой детали. Воздействие

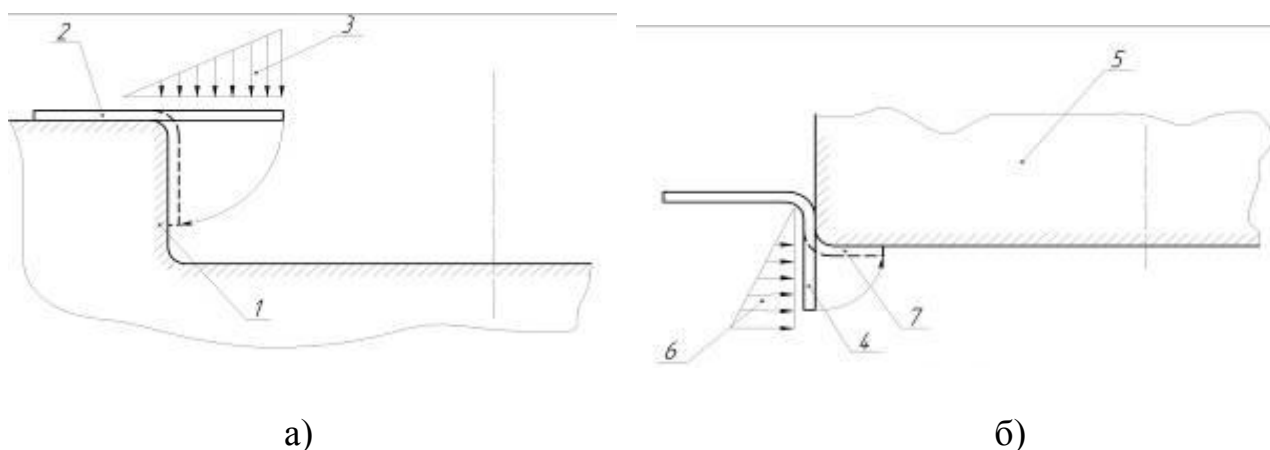


Рис. 12. Последовательность этапов формообразования окантовки

давлением импульсного магнитного поля 3 при этом желательно выполнять неравномерным, как показано на рис. 12,а, что связано с неравномерным перемещением части листовой заготовки, подвергаемой этому воздействию. Там, где кромка отверстия листовой заготовки будет перемещаться на большую величину, потребуется создание большего давления, там же где перемещения не будет, это воздействие давления импульсного магнитного поля можно существенно снизить. Таким образом, формообразование профилированной листовой детали можно разбить на два этапа. Вначале, в процессе реализации первого этапа производят формообразование операцией отбортовки боковой части профиля до требуемой величины, меняют инструмент – матрицу на пуансон, а затем уже саму боковую стенку деформируют операцией обжима по пуансону, придавая деформируемой части стенки форму пуансона (рис. 12,б). В результате реализации этого предложения получается листовая деталь с профилированной переходной поверхностью.

При образовании боковой стенки детали можно применять вкладыши в матрицу, которые позволяют изменять углы наклона боковой стенки и выполнять его меньшим прямого угла или делать его переменным по периметру отбортовки, а также изменять радиус скругления перехода от плоской листовой заготовки к бортовой части. Предложение позволяет также менять форму и глубину установки пуансона, что позволяет варьировать формой профильной части и глубиной профилирования практически без применения другого инструмента. Имеется возможность изготавливать профилированные детали типа тел вращения или коробчатой формы.

### **Выводы**

1. Анализ существующих способов изготовления листовых деталей типа окантовок из алюминиевых показал, что усложнение форм деталей, повышение требований к точности их изготовления при сокращении ручных доводочных работ, использование современных высокопрочных материалов требует совершенствования используемых в настоящее время технологических процессов и методов расчета технологических параметров.
2. Разработаны математические более полные модели процессов пластического формоизменения при приложении магнитно-импульсного воздействия на листовую заготовку, учитывающие многообразие факторов, действующих на эту листовую заготовку в процессе штамповки по матрице, включая поведение заготовки при формообразовании листового материала по

жесткой матрице, обеспечивающее достаточную для инженерных расчетов точность.

3. Определено влияние магнитно-импульсного деформирования на механические и технологические характеристики материалов после воздействия давлением импульсного магнитного поля и формообразования по матрице.

4. Разработана методика численного моделирования процесса формообразования с помощью многоцелевого конечно-элементного комплекса ANSYSLS-DYNA с возможностью варьирования параметров магнитно-импульсной штамповки, характеристик материалов и геометрических размеров изготавливаемых заготовок.

#### **Библиографический список**

1. Горбунов М.Н. Основы технологии производства самолетов. - М.: Машиностроение, 1976. - 258 с.
2. Грошиков А.И., Малафеев В.А. Заготовительно-штамповочные работы в самолетостроении. - М.: Машиностроение, 1976. - 440 с.
3. Попов О.В., Иванов Е.Г., Шалунов Е.П., Колесников Н.П., Астапов В.Ю. Импульсные методы обработки металлов. – Чебоксары: ЧГУ, 1982. - 66 с.
4. Астапов В.Ю., Джоздани М.С. Некоторые вопросы технологии изготовления листовых деталей самолетов методом магнитно-импульсной обработки // Сборник трудов, посвященный 70-летию кафедры СМиИГ, Москва, РИК им. Румянцева, 2010, 270 с.

5. Марковцев В.А., Филимонов В.И., Марковцева В.В. Разработка автоматизированной линии раскроя листовых и рулонных авиационных сплавов В95пчАМ и 1163АМ. // Труды МАИ. 2014. №76. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=50089>
6. Астапов В.Ю., Джоздани М.С., Попов А.П. Экспериментальное определение формообразования профиля окантовок из листового материала воздействием импульсного магнитного поля // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2011. № 8. С. 8-11.
7. Астапов В.Ю., Джоздани М.С. Способ получения профилированной листовой детали. Патент РФ 2477665. Бюлл. № 8, 20.03.2013.