

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
«САМАРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК»
(САМНЦ РАН)

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

МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ (МИОМ)

Монография

Одобрено редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

САМАРА
АНО «Издательство СНЦ»
2019

УДК 621.9
ББК 34.5
М 126

Авторы: *Прокофьев А.Б., Беляева И.А., Глущенков В.А., Карпухин В.Ф., Черников Д.Г., Юсупов Р.Ю.*

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

Прокофьев, Андрей Брониславович

М126 **Магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ):** монография /
А.Б. Прокофьев [и др.] – Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2019. –
140 с.: ил.

ISBN 978-5-6043593-4-1

Монография посвящена одному из специальных видов обработки материалов с использованием воздействия на заготовки импульсных магнитных полей высокой напряженности. Описаны физические основы магнитно-импульсных технологий, технологические схемы процессов, применяемое специальное оборудование и технологическое оснащение.

Особое внимание уделено примерам полученных полуфабрикатов, деталей и узлов изделий машиностроения и металлургии, оценке их качества.

Предназначена для научных сотрудников, инженеров и студентов, интересующихся вопросами технологий производства изделий машиностроения и металлургии.

УДК 621.9
ББК 34.5

ISBN 978-5-6043593-4-1

© Прокофьев А.Б., Беляева И.А., Глущенков В.А.,
Карпухин В.Ф., Черников Д.Г., Юсупов Р.Ю., 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Физические основы магнитно-импульсной обработки материалов ...	7
2 Технологические схемы и области применения магнитно-импульсной обработки	13
3 Магнитно-импульсные технологии в заготовительно-штамповочном производстве	20
3.1. Формообразующие операции	20
3.2. Операции калибровки	30
3.3. Разделительные операции	32
4 Магнитно-импульсные технологии в сборочном производстве	36
5 Магнитно-импульсные технологии в сварочном производстве	41
6 Разработка гибридных и комбинированных технологий, сочетающих статическое и магнитно-импульсное нагружения	46
7 Магнитно-импульсное воздействие на расплавы	59
7.1 Магнитно-импульсная обработка в литейном производстве	61
7.2 Магнитно-импульсная обработка в прокатном производстве	71
7.3 Магнитно-импульсная обработка в металлургии	74
7.4 Магнитно-импульсное воздействие на сварочный шов	75
8 Порошковая металлургия. Магнитно-импульсное уплотнение порошковой композиции	78
9 Формирование механических и эксплуатационных свойств материалов и изделий под воздействием импульсных магнитных полей	83

10	Специальное применение импульсных магнитных полей	87
10.1	Управляемое отделение наноспутников с помощью импульсного магнитного поля	87
10.2	Установка стержневых элементов на больших глубинах для закрепления датчиков мониторинга морского пространства	91
10.3	Очистка внутренней поверхности нефтепромысловых труб	92
11	Типовой ряд магнитно-импульсных установок – оборудование для МИОМ	94
12	Инженерная методика проектирования и компьютерного моделирования процессов магнитно-импульсной обработки материалов	109
13	Индукторы и технологическая оснастка для магнитно-импульсной обработки	117
14	Производственные участки магнитно-импульсной обработки и результаты реализации	124
	Заключение	127
	Список литературных источников	129

ВВЕДЕНИЕ

Данная монография посвящена разработке и использованию в промышленности магнитно-импульсных технологий [1] (от идеи до создания и запуска специализированных промышленных участков «под ключ»). Проведены фундаментальные и прикладные исследования процессов, осуществляемых под воздействием импульсных магнитных полей (ИМП) высокой напряженности.

В результате разработан и освоен комплекс технологических процессов машиностроения и металлургии:

- листовой штамповки;
- калибровки;
- сборки;
- сварки;
- литья и других.

Области использования импульсных магнитных полей значительно расширены за счёт разработки новых научно-технических направлений:

- гибридных и комбинированных процессов;
- процессов, основанных на воздействии ИМП на расплавы;
- технологий порошковой металлургии;

– специального применения ИМП для решения специфических задач в космосе, нефтедобыче, освоении морского пространства.

Созданы методики и рекомендации расчета и проектирования новых технологий.

Большое внимание в работе уделено практической реализации магнитно-импульсных технологий – созданию гаммы уникального оборудования (магнитно-импульсных установок), инструмента (индукторов), основной и вспомогательной оснастки, организации производства, обеспечению требований техники безопасности.

Работа иллюстрирована многочисленными примерами (фотографиями) деталей и узлов, изготовленных с использованием новых технологий, с оценкой их качества и экономической эффективности. Техническая и экономическая эффективность разработок, доведённых до промышленной реализации, подтверждается их масштабным использованием на предприятиях аэрокосмической, электронной, судостроительной, автомобильной, электротехнической, атомной, нефтедобывающей и других отраслей машиностроения и металлургии. Даны также примеры функционирующих производственных участков, где реализованы данные технологии.

1 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Процесс магнитно-импульсной обработки материалов (МИОМ) основан на преобразовании электрической энергии, запасенной в накопителе, в переменное магнитное поле, выполняющее работу пластической деформации заготовки или разгоняющее твердое тело. Подавляющее большинство магнитно-импульсных установок (МИУ) имеет емкостной накопитель энергии – батарею конденсаторов [2].

Принципиальная схема установки с емкостным накопителем энергии показана на рис. 1.1 [3].

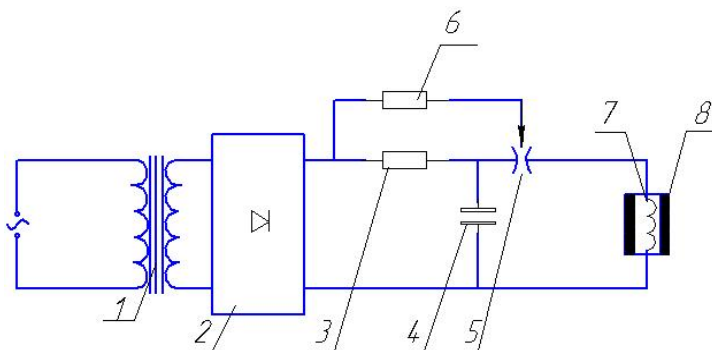


Рис. 1.1 – Принципиальная схема магнитно-импульсной установки:
1 – повышающий трансформатор; 2 – выпрямитель;
3 – зарядное сопротивление; 4 – батарея конденсаторов;
5 – коммутатор; 6 – блок управления; 7 – индуктор; 8 – деталь

При включении установки в сеть конденсаторная батарея 4 с помощью зарядно-выпрямительного устройства, включающего в себя повышающий трансформатор 1, выпрямитель 2 и зарядное сопротивление 3, заряжается до заданного регулятором запасаемой энергии b напряжения, составляющего от единиц до десятков тысяч вольт. Энергия W , запасенная в батарее конденсаторов, равна [3]:

$$W = \frac{CU^2}{2}, \quad (1.1)$$

где C – емкость батареи конденсаторов МИУ;

U – напряжение заряда.

После достижения на конденсаторной батарее заданного напряжения на поджигающий электрод трехэлектродного разрядника 5 от блока управления 6 подается поджигающий импульс, инициирующий электрический пробой рабочего промежутка разрядника и коммутирующий разрядную цепь. При протекании по индуктору 7 импульса тока вокруг индуктора создается переменное магнитное поле, которое наводит в обрабатываемой заготовке 8, изготовленной из электропроводного материала, вихревые токи, имеющие обратное по отношению к току индуктора направление. Следовательно эту систему можно рассматривать как трансформатор, у которого в качестве первичной обмотки выступает индуктор, а заготовка является вторичной обмоткой [3]. Ток, протекающий в разрядной цепи магнитно-импульсной установки, имеет характер затухающей синусоиды, представленной на рис. 1.2.

Длительность импульса тока не превышает одной тысячной доли секунды. Следовательно мощность, выделяемая в разрядной цепи, многократно превышает значение, потребляемое из питающей сети. Частота колебаний разрядного тока $f = \frac{1}{T}$, где T – период

колебаний тока, для процессов магнитно-импульсной обработки обычно составляет величину от 5 до 50 кГц.

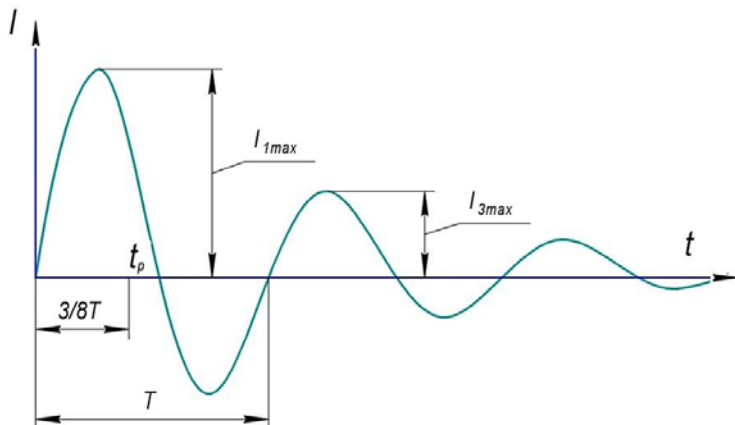


Рис. 1.2 – Характер изменения разрядного тока I по времени t

Вследствие закона близости токи в индукторе и заготовке стягиваются к поверхностям, обращенным друг к другу. Степень проникновения магнитного поля в проводящую среду характеризуется величиной скин-слоя. Он равен расстоянию от поверхности проводящей среды до расстояния, на котором амплитуда тока уменьшается в « e » раз. Величина скин-слоя тем меньше, чем ниже удельное электрическое сопротивление материала и выше частота колебаний разрядного тока.

Два параллельных проводника с токами противоположных направлений отталкиваются, взаимодействуют между собой магнитные поля токов в индукторе и в заготовке.

Силовое воздействие на обрабатываемую заготовку со стороны индуктора осуществляется дистанционно, то есть без механического или электрического контакта между инструментом и обрабатываемой заготовкой. Это явление существенно отличает процесс

магнитно-импульсной обработки от других статических и импульсных методов обработки металлов давлением и позволяет деформировать детали, имеющие полированные, окрашенные или каким-либо покрытием поверхности, обрабатывать импульсным магнитным полем расплавы металлов, а также обрабатывать объекты, помещенные в контейнеры с вакуумом или с контролируемой атмосферой.

Сила взаимодействия проводников увеличивается по мере роста силы тока в проводниках и уменьшения расстояния между ними.

Кроме того, эффективность силового воздействия на заготовку при магнитно-импульсной обработке существенным образом зависит от электропроводности обрабатываемого материала. Наиболее предпочтительно использовать метод для обработки материалов с высокой электропроводностью, например алюминиевых или медных сплавов [4].

Батарея конденсаторов магнитно-импульсной установки заряжается до напряжения, составляющего 5...20 тысяч вольт, поэтому минимальная величина изоляционного зазора δ между заготовкой и индуктором определяется электрической прочностью изоляции индуктора. Кроме того, индуктор должен иметь защитный слой, предохраняющий изоляцию от механических повреждений, и обеспечивать возможность обработки любой заготовки, имеющей размеры в поле допуска при обработке цилиндрических деталей. На практике величина изоляционного зазора между индуктором и заготовкой составляет $\delta = 1,5 \dots 3$ мм.

Поскольку токи в индукторе и заготовке распределяются по их толщине, то электродинамические силы взаимодействия индуктора и заготовки имеют объемный характер. Силовое воздействие на заготовку со стороны индуктора характеризуется величиной давления

импульсного магнитного поля, которая равна сумме электродинамических сил, действующих на заготовку, отнесенной к единице поверхности заготовки. Зависимость давления магнитного поля на заготовку от времени имеет характер квадратичной затухающей синусоиды. Амплитудное значение давления импульсного магнитного поля на заготовку P_m определяется выражением [5]:

$$P_m = \frac{\mu_0}{2} (H_{m1}^2 - H_{m2}^2), \quad (1.2)$$

где H_{m1} и H_{m2} – напряженность магнитного поля в зазоре «индуктор – заготовка» и проникшего через заготовку – соответственно.

Если толщина заготовки s превышает величину скин-слоя в заготовке, то в формуле (1.2) $H_{m2} = 0$. Если толщина заготовки меньше величины скин-слоя, то при подлете заготовки к металлической матрице проникшее через заготовку магнитное поле подвергается сжатию и оказывает противодействие на заготовку, что препятствует оформлению заготовки по матрице. Это явление в литературе называют «эффектом магнитной подушки». Для снижения негативного влияния проникновения магнитного поля через стенку заготовки следует обеспечивать такую частоту разрядного тока, при которой скин-слой в заготовке меньше ее толщины, или использовать матрицы, изготовленные из диэлектрических материалов.

Для создания электродинамических сил, способных деформировать обрабатываемую заготовку, необходимо обеспечить протекание по индуктору тока силой порядка десятков и сотен тысяч ампер. Естественно, что при протекании столь мощных токов в индукторе и заготовке выделяется тепло [1,2,5]. Следовательно при магнитно-импульсной обработке силовое воздействие на заготовку сопровождается ее нагревом. Температура нагрева заготовки определяется характеристиками разрядного тока, толщиной заготовки и

физическими свойствами материала, из которого она изготовлена. Следует иметь в виду, что тепло выделяется в скин-слое. Поэтому во время протекания импульса тока приповерхностные слои заготовки, обращенные к индуктору, и рабочая поверхность индуктора могут нагреваться до высоких температур. В дальнейшем за счет теплопроводности происходит перераспределение тепла по всему объему индуктора и заготовки. При обработке заготовок из алюминиевых сплавов температура заготовки после съема ее с оснастки обычно меньше 100°C.

Источником тепла в заготовке является также деформационный нагрев, то есть переход части работы деформации заготовки в тепло при отсутствии теплообмена с окружающей средой вследствие малого времени деформирования. Нагрев заготовки в процессе деформирования повышает пластичность материала и обеспечивает повышение допустимой степени деформации заготовки без ее разрушения [2].

Из изложенного следует, что процессы магнитно-импульсной обработки сопровождаются созданием вокруг индуктора мощного магнитного поля, силовым воздействием на проводящий объект, расположенный вблизи индуктора, и нагревом этого объекта индуцированными в нем токами, что потребовало подробного рассмотрения и решения уравнений электродинамики, гидродинамики, уравнений движения, волновых процессов, процессов соударения.

Разработка и изучение физических основ магнитно-импульсной обработки позволили создать и проанализировать физические и математические модели процессов, положить их в созданные расчётные методики и компьютерное моделирование.

2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Существуют две группы технологических схем магнитно-импульсной обработки:

- технологические схемы непосредственного воздействия импульсного магнитного поля на заготовку [6];
- технологические схемы воздействия ИМП на заготовки через промежуточные твердые, эластичные, жидкостные среды [7].

К первой группе относятся технологические схемы на «обжим», на «раздачу» и «плоская» (рис. 2.1) [2].

При использовании технологической схемы «обжим» трубчатая заготовка размещается внутри цилиндрического индуктора. Электродинамические усилия стремятся сжать заготовку, уменьшить диаметр.

В технологической схеме «раздача» заготовка располагается снаружи индуктора. Давление ИМП стремится «раздуть» заготовку, увеличить ее диаметр.

В плоской технологической схеме используется спиральный плоский индуктор, например спираль Архимеда, над которым располагается обрабатываемая плоская заготовка.

Ко второй группе относится технологическая схема штамповки с использованием «спутника» (рис. 2.2, *a*), или магнитно-импульсного привода (рис. 2.2, *б*) [3].

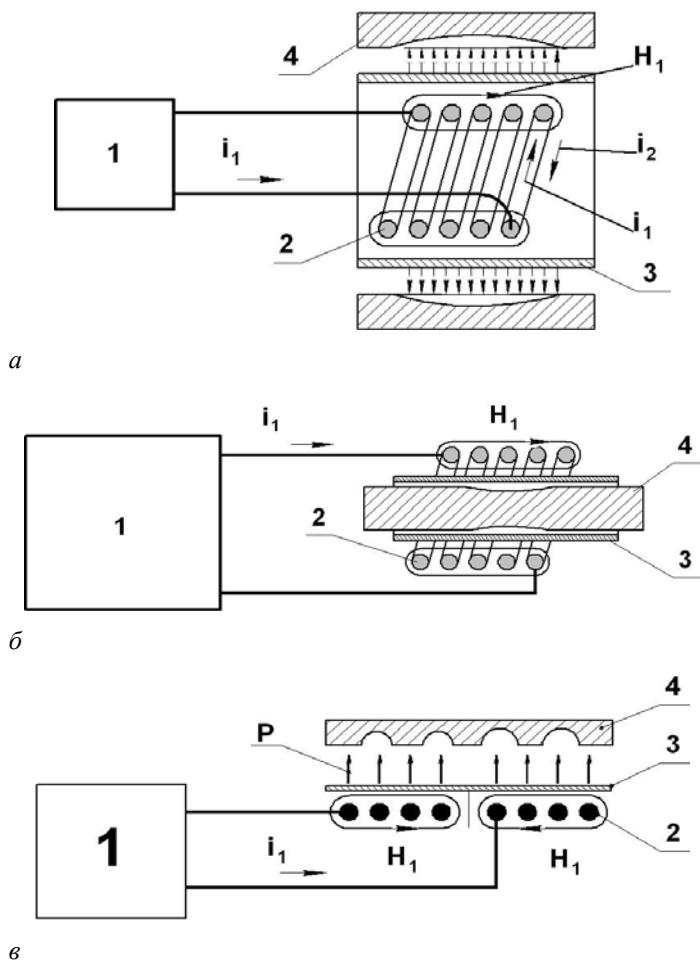


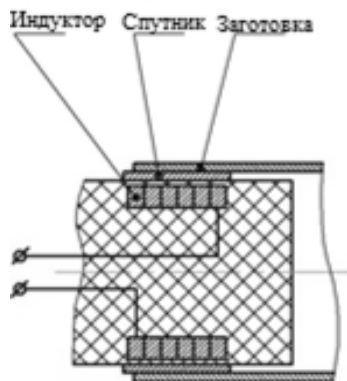
Рис. 2.1 – Схемы обработки: *а* – «обжим»; *б* – «раздача»; *в* – «плоская»;

1 – МИУ; *2* – индуктор; *3* – заготовка; *4* – матрица / контродаль;

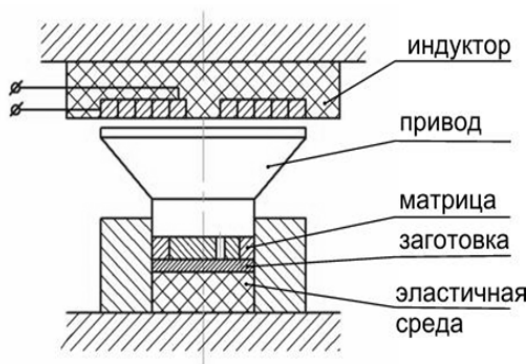
i_1 – импульсный ток в индукторе; i_2 – вихревой ток в заготовке;

H_1 – напряженность импульсного магнитного поля;

P – электродинамические силы



a



б

Рис. 2.2 – Схемы магнитно-импульсного воздействия через промежуточные среды: *a* – «спутник»; *б* – привод

В качестве «спутника» используется заготовка из хорошо электропроводного материала. Например, это намотанная в несколько слоев алюминиевая фольга.

Применение «спутников» позволяет обрабатывать (передавать усилие) заготовки из плохо электропроводных материалов. После совместного деформирования заготовки и «спутника» последний удаляется.

В этих схемах (рис. 2.2, б) магнитно-импульсное усилие передается на привод, который далее либо непосредственно деформирует металл (например, электромагнитный молоток для клепки), либо осуществляет деформирование заготовки через еще одно промежуточное тело – эластичную среду.

Кроме того, возможны схемы, при которых индуктор (стержень) и заготовка представляют единую электрическую цепь, что позволило обрабатывать детали малых размеров.

Области применения магнитно-импульсной обработки (МИОМ) показаны на рис. 2.3.



Рис. 2.3 – Области применения МИОМ

В качестве примера выполняемые операции листовой штамповки приведены на рис. 2.4.



Преимущества:

- Высокая точность готовых деталей;
- Возможность обработки концов длинномерных труб;
- Повышение предельных возможностей штамповки за один переход, сокращение числа переходов;
- Расширение технологических возможностей, совмещение операций;
- Изготовление деталей без кольцевых сварных швов;
- Высокая производительность процессов;
- Малая металлоемкость оснастки.

Рис. 2.4 – Направление использования ИМП в заготовительно-штамповочном производстве (см. также с. 18, 19)



Преимущества:

- ❑ Сопутствующая калибровка участков детали, прилегающих к линии реза. В зависимости от используемой схемы процесса возможна калибровка по наружному или внутреннему диаметру заготовки;
- ❑ Качество реза и точность калибровки позволяют осуществлять последующую сварку деталей встык как в ручном, так и в автоматическом режимах без использования дополнительных операций подгонки;
- ❑ Величина отхода не превышает $(3...5)S$, при этом минимальная величина обрезанного припуска $3S$;
- ❑ Высокая производительности труда;
- ❑ Минимальный объем ручных работ;
- ❑ Повышение точности и надежности изделий;
- ❑ Имеется возможность совмещения разделительных операций с формообразующими, калибровочными или сборочными.

Рис. 2.4 – Продолжение



Преимущества:

- ❑ Процесс позволяет повысить точность:
 - концов труб, патрубков, пустотелых деталей, в том числе со сложной формой поперечного сечения под сборку, сварку, пайку;
 - пустотелых деталей по всей длине образующей.
- ❑ В зависимости от выбранной схемы обработки калибровка осуществляется по наружному или внутреннему контуру детали.

Рис. 2.4 – Окончание

Магнитно-импульсные технологии обеспечили прорывные технические решения при создании изделий аэрокосмического, электротехнического, электронного, судостроительного, атомного, нефтедобывающего и других назначений.

3 МАГНИТНО - ИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАГОТОВИТЕЛЬНО-ШТАМПОВОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Проведя системные фундаментальные и прикладные исследования, изучив механизм высокоскоростного деформирования (взаимодействия), удалось разработать как отдельные технологические приёмы, так и инновационные технологические процессы в целом, позволившие получать детали и изделия требуемого качества при одновременном снижении материальных и трудовых затрат при их производстве. Ниже приведены примеры некоторых из разработанных приёмов и процессов и фотографии деталей, полученных с их помощью.

3.1 Формообразующие операции

Магнитно-импульсная формовка позволяет деформировать как всю заготовку в целом, так и ее часть. Так формовка переходников на концах длинномерных труб позволяет сократить количество сварных швов на трубопроводе, что повышает его надежность и снижает производственные затраты [6].

По форме заготовок процессы делятся на формовку трубчатых заготовок и формовку листовых заготовок [8]. На рис. 3.1 представлены типовые цилиндрические детали, получаемые магнитно-импульсной формовкой.

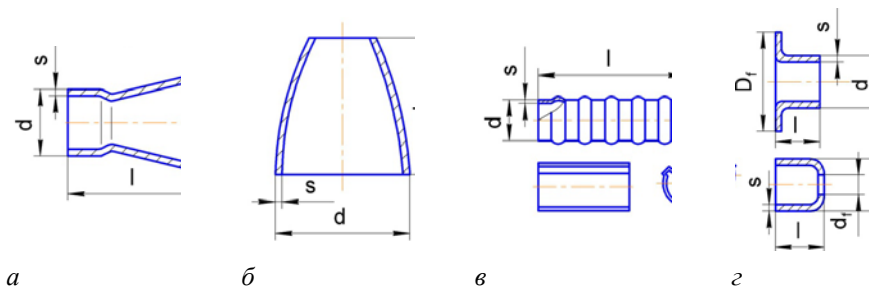


Рис. 3.1 – Типовые операции магнитно-импульсной формовки трубчатых заготовок

Типичными представителями деталей, получаемыми с помощью магнитно-импульсной формовки из полых заготовок, являются [9]:

- трубчатые переходники (*a*);
- крупногабаритные полые оболочки (*б*);
- трубы с продольными или поперечными рифтами (*в*);
- трубы с наружными или внутренними фланцами (*г*).

Разделение деталей на трубчатые переходники (тип *a*) и оболочки (тип *б*) произведено по конструктивно-технологическому признаку. Переходники изготавливаются из трубчатых заготовок, имеющих диаметр $d = 40 \dots 120$ мм и толщину стенки $s = 1 \dots 3$ мм. Переходники формируются по схемам раздачи или обжима трубчатой заготовки в зависимости от формы детали. При изготовлении переходников простой формы с использованием схемы обжима заготовки ее минимальный диаметр может составлять 10 мм. Длина деформируемого участка заготовки l обычно составляет 20...600 мм. Если переходник формируется на конце трубы, то длина заготовки не ограничивается.

Типовые представители переходников, изготовленные на производстве, показаны на рис. 3.2.



Рис. 3.2 – Примеры трубчатых переходников, полученных магнитно-импульсной формовкой

Особую группу представляют переходники сложной формы, к которой относятся детали со смещением осей симметрии приторцевых участков, детали, включающие участки, имеющие плоские выштамповки, сечение в виде многоугольника или эллипса. Примеры переходников сложного контура представлены на рис. 3.3.

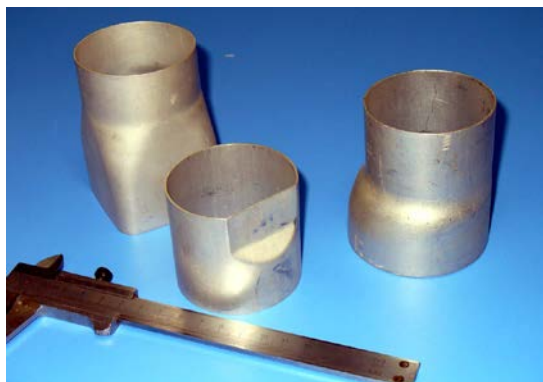


Рис. 3.3 – Переходники сложного контура

Особенностью изготовления переходников сложного контура является неравномерность деформации по периметру заготовки. Деформация заготовки распределяется пропорционально величине зазора между заготовкой и оправкой или матрицей. В связи с этим остаточные напряжения в детали также распределяются неравномерно по периметру и сечению. Деталь после формовки искажена, например, принимает форму эллипса [9]. Для исправления этого дефекта применяют последующую калибровку детали. При этом энергия разряда калибрующего импульса должна быть на 20...40% выше формующего [10]. Следовательно отличительной чертой изготовления деталей сложной формы является то, что требования по точности их изготовления могут быть обеспечены только при использовании двух или более импульсов.

К оболочкам относятся детали, имеющие диаметр d от 100 до 1200 мм, толщину стенки от 1 до 3 мм и длину l от 40 до 1000 мм. В процессе деформирования крупногабаритных заготовок величина деформации заготовки за один переход ограничивается не только ресурсом пластичности материала, но и падением эффективности силового воздействия магнитного поля на заготовку при больших зазорах между индуктором и заготовкой.

При формовке оболочек двойной кривизны из конусной заготовки (рис. 3.4) предложена оригинальная схема с использованием секционированного индуктора [11]. Формовка заготовки при каждом импульсе производится секцией индуктора, имеющей наименьшее значение зазора с заготовкой. Это позволило за счет эффективного использования энергии обрабатывать оболочки больших габаритов на установках средней энергоемкости [12].



Рис. 3.4 – Обтекатель, изготовленный последовательной формовкой с помощью секционного индуктора

Магнитно-импульсная формовка позволяет изготавливать трубчатые детали с поперечными или продольными рифтами. Диаметр труб с поперечными рифтами d может составлять от 40 до 250 мм, толщина стенки – от 1 до 3 мм, длина – от 40 до 2000 мм. Предельная высота рифта ограничивается ресурсом пластичности материала трубы.

Формовка поперечных рифтов на трубах может осуществляться по двум вариантам [13]: формовка всех рифтов за один импульс и формовка каждого рифта отдельно с перемещением индуктора между импульсами на шаг, равный расстоянию между осями рифтов. Последний вариант позволяет эффективно использовать энергию, накопленную в батарее конденсаторов магнитно-импульсной установки, поэтому используется чаще, чем первый. Для снижения

величины утонения стенки трубы на радиусе перехода от цилиндра к рифту длину индуктора следует выбирать меньше ширины рифта.

Примеры деталей с поперечными и продольными рифтами приведены на рис. 3.5.



Рис. 3.5 – Детали с рифтами, полученные с использованием ИМП

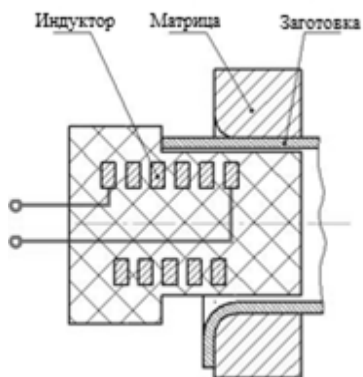
При формовке поперечных рифтов необходимо использовать матрицу с осевым разъемом.

Трубы с наружными и внутренними фланцами, представленные на рис. 3.6, б, в, формируются по схеме «раздача» и «обжим» соответственно. Процесс формовки наружного фланца схематично представлен на рис. 3.6, где выше оси показана исходная форма заготовки, а ниже оси – форма готовой детали. Примеры деталей с фланцами представлены на том же рисунке.

К листовой формовке относятся технологические процессы, осуществляемые индуктором, ось рабочей зоны которого перпен-

дикулярна поверхности заготовки. Примеры типовых деталей, получаемых листовой формовкой, показаны на рис. 3.7.

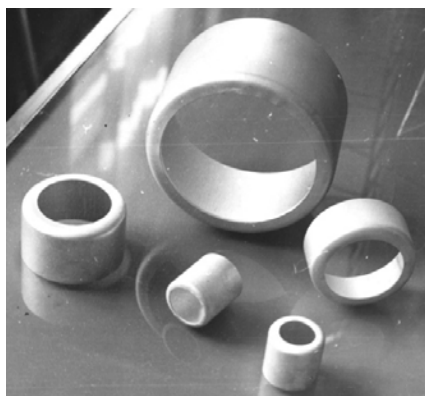
Примеры деталей, освоенных на промышленных предприятиях и имеющих отбортовки наружного и внутреннего контура, показаны на рис. 3.8.



a



б



в

Рис. 3.6 – Схема формовки (*a*);
детали с наружным (*б*) и внутренними (*в*) фланцами

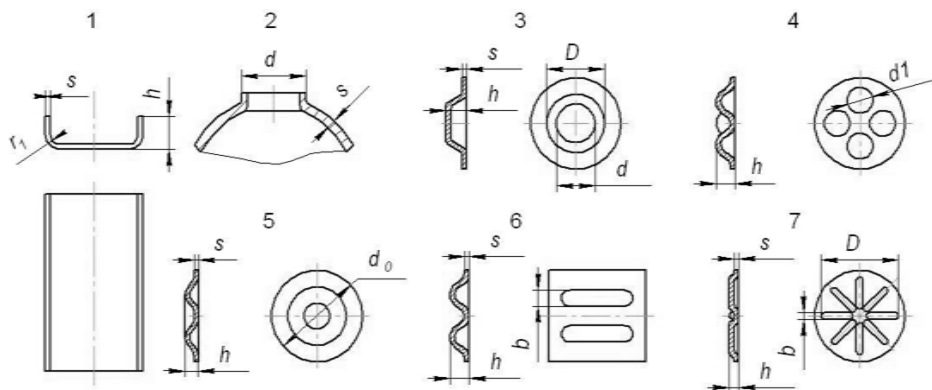


Рис. 3.7 – Типовые детали, получаемые листовой штамповкой

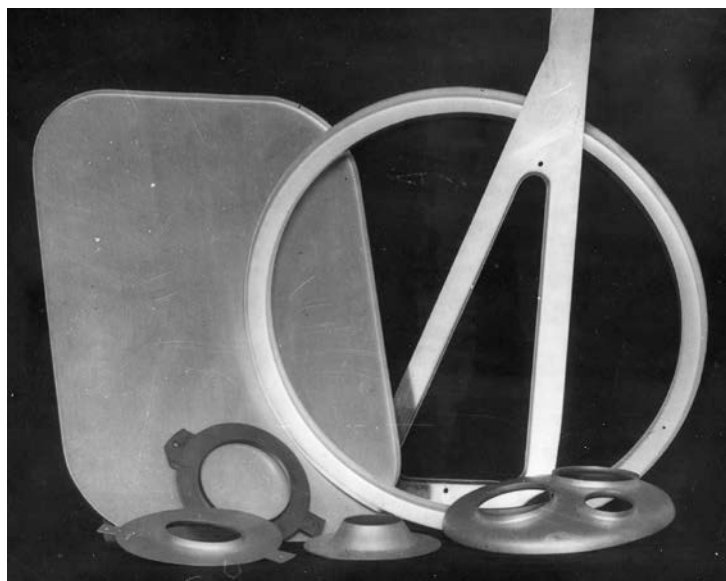


Рис. 3.8 – Листовые детали с отбортовкой наружного и внутреннего контура

Особенностями изготовления деталей с отбортовками многоугольной формы является то, что на прямолинейных участках получение борта близко к схеме гибки, в то время как на участках

скругления профиля борта процесс аналогичен процессу отбортовки горловин круглой формы. Естественно, что для формирования этих участков требуются различные уровни давления ИМП.

Регулирование распределения давления ИМП по периметру заготовки производится путем изготовления выборки в углах индуктора (профилирование формы токопровода).

Разработана технология получения трубчатых деталей с отбортованными горловинами, имеющих широкое распространение в машиностроении. Процесс отбортовки горловин на трубах схематически представлен на рис. 3.9.

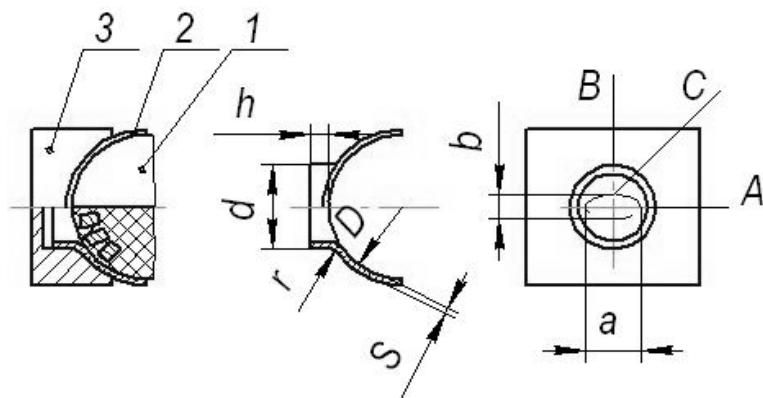


Рис. 3.9 – Схема отбортовки горловины на трубе:

1 – индуктор; 2 – заготовка; 3 – матрица

Отбортовка горловин на трубчатых заготовках производится с помощью плоского индуктора, рабочая зона и корпус которого имеют цилиндрическую форму, соответствующую внутреннему контуру заготовки. Предварительно в трубчатой заготовке изготавливается эллипсное отверстие при формовке горловины с плоским торцом, или круглое – при седлообразной форме торца горловины.



Рис. 3.10 – Трубы с отбортованными горловинами

Примеры труб с отбортованными горловинами показаны на рис. 3.10.

Максимально возможная высота горловины h_{\max} при отбортовке трубчатой заготовки может быть оценена по выражению [14]:

$$h_{\max} = \left[d \left(1 - \frac{1}{K_{pm}} \right) + r(4 - \pi) + s(2 - 0,5\pi) \right]. \quad (3.1)$$

При отбортовке сравнительно невысоких горловин ($K_p < 0,5$ и $d/D < 0,5$) величина неприлегания борта заготовки к матрице не превышает 0,25 мм. При использовании последующей калибровки горловины отклонение контура горловины от матрицы не превышает 0,15 мм во всем диапазоне K_p и d/D без промежуточного отжига заготовки и 0,05 мм – с использованием отжига заготовки перед калибровкой.

3.2 Операции калибровки

Назначением калибровочных операций является обеспечение формы и размеров детали, соответствующих требованиям чертежа. Предложено калибровку деталей использовать в качестве отдельной операции или включать в комплексный технологический процесс магнитно-импульсной формовки или других методов штамповки [15].

Примерами служат процессы калибровки концов труб и сифонов для обеспечения требований последующего процесса сварки.

Точность деталей после калибровки соответствует 9...11 квалитетам, а в отдельных случаях может быть доведена до 7 квалитета [9].

Существуют две разновидности магнитно-импульсной калибровки, которые отличаются сопровождающими их процессами [3]: без предварительной деформации и с предварительной деформацией заготовки. Первая разновидность не сопровождается соударением детали с матрицей или оправкой, следовательно процесс носит квазистатический характер. При калибровке по второму варианту процесс сопровождается соударением заготовки с инструментом и его результат существенным образом определяется волновыми эффектами.

Основное использование калибровки без предварительной деформации заготовки [3] – устранение овальности трубчатой заготовки без изменения ее периметра или правка плоской детали, имеющей отклонения формы, что достигается за счет перераспределения остаточных напряжений в материале.

Магнитно-импульсная технология является эффективным методом калибровки плоских деталей. В качестве примера можно привести процесс калибровки волнообразной кольцевой пружины из бериллиевой бронзы, показанной на рис. 3.11.

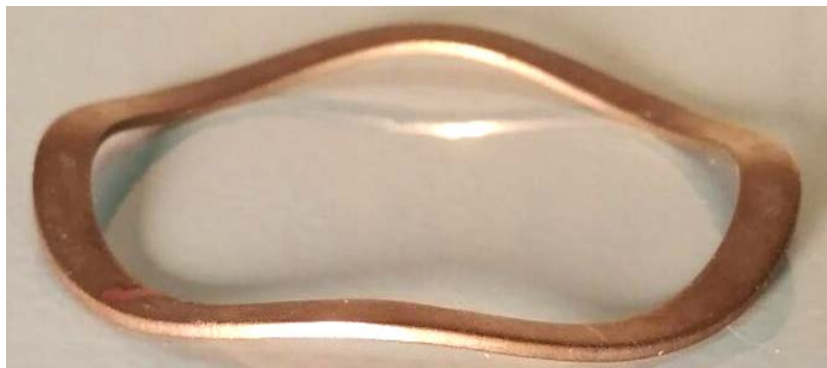


Рис. 3.11 – Волнообразная пружина

Для нормальной работы пружины ее выступы не должны отклоняться от плоскости более чем на 0,3 мм. После изготовления и термообработки пружины данное требование не выполнялось. Попытки калибровки пружины только за счет механического воздействия статическим и импульсным давлением в жестком штампе, в том числе с использованием прессы с магнитно-импульсным приводом, не дали положительного результата. Непосредственное воздействие импульсного магнитного поля на пружину позволило осуществить калибровку детали, что объясняется специфическими особенностями процесса – комплексным термомеханическим воздействием на обрабатываемый материал.

Калибровка с предварительной деформацией заготовки используется наиболее часто в качестве заключительной операции магнитно-импульсной формовки деталей [2, 3].

Исследования процесса калибровки показали, что для достижения заданной точности детали необходимо обеспечить определенный диапазон скоростей соударения ее с матрицей.

Достаточно распространенной операцией является калибровка концов сильфонов, которая позволяет исключить селективную подборку сильфонов и фланцев при сварке трубопроводов различных агрегатов. Сильфоны часто изготавливаются из материалов, обладающих низкой электропроводностью, поэтому при их калибровке используют «спутники» [3].

На рис. 3.12 представлены сильфоны из нержавеющей стали после калибровки их концов.



Рис. 3.12 – Сильфоны из нержавеющей стали

При калибровке деталей простой формы спутники удается использовать многократно, но чаще всего они используются один раз.

3.3 Разделительные операции

Наиболее эффективными направлениями использования разделительных операций давлением ИМП являются резка труб на мерные длины [16], торцовка трубчатых заготовок, а также пробивка отверстий в трубчатых и полых деталях [17]. Технологические схемы осуществления разделительных операций представлены на

рис. 3.13. Операции магнитно-импульсной резки могут осуществляться на полых заготовках, имеющих в зоне реза круглую, прямоугольную или иную форму поперечного сечения [9].

Примеры деталей, полученные с использованием операции резки, приведены на рис. 3.14.

Важной особенностью процесса является то, что одновременно с резкой происходит калибровка участков заготовки, прилегающих к линии реза.

Качество поверхности разделения и достигаемая точность калибровки соответствуют требованиям, предъявляемым к деталям, подвергаемым в дальнейшем сварке в ручном или автоматическом режимах.

На рис. 3.15, показана возможность многопереходного процесса изготовления детали из трубчатой заготовки с использованием операций формовки, калибровки, резки и приведена оснастка для ее изготовления.

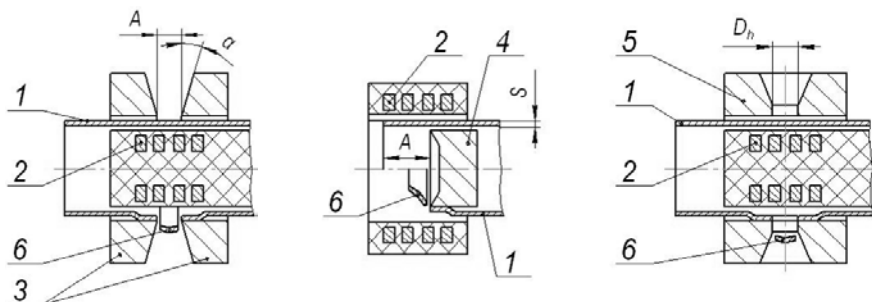


Рис. 3.13 – Схемы разделительных операций:

- 1 – заготовка; 2 – индуктор; 3 – матрица разрезная; 4 – оправка;
5 – матрица вырубная; 6 – отход

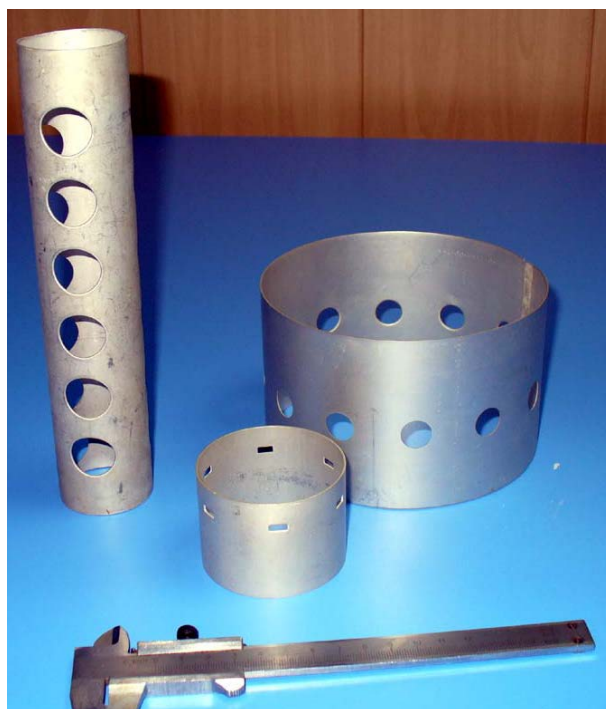
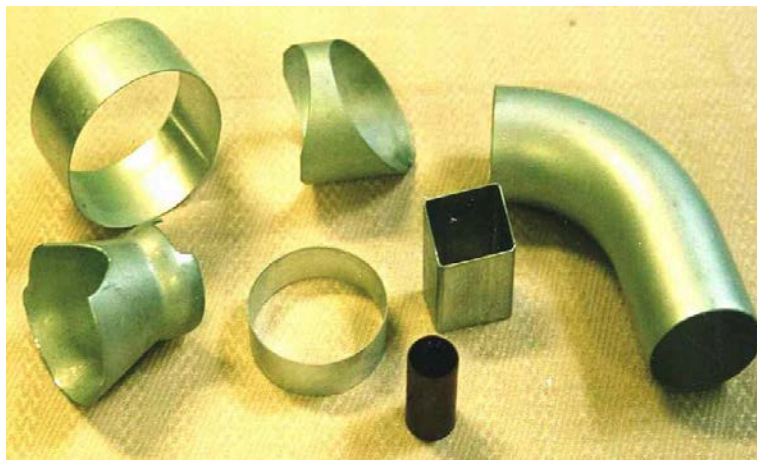
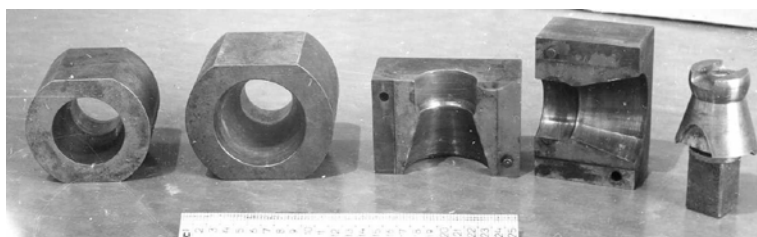


Рис. 3.14 – Детали после обрезки припуска и трубы с пробитыми отверстиями



а



б

Рис. 3.15 – Последовательность изготовления детали *а* и оснастка для ее изготовления *б*

Использование технологий МИОМ позволило изготавливать данную деталь из трубы, а ранее она изготавливалась механической обработкой из прутка. Это дало значительную экономию материалов и трудозатрат.

4 МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СБОРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Процессы магнитно-импульсной сборки предназначены для получения неразъемных соединений деталей из однородных и разнородных материалов. Деталь, к которой прикладывается давление ИМП, называется деформируемой. Деформируемая деталь чаще всего является тонкостенной металлической. Вторая деталь называется неподвижной, или контрдеталью. Важной особенностью магнитно-импульсной сборки является нагрев деформируемой детали вихревыми токами. Поэтому при сборке трубчатых деталей по схеме обжима деформируемая деталь напрессовывается на неподвижную деталь в «теплом» состоянии и при остывании величина натяга в соединении увеличивается.

Прочность соединения деталей цилиндрической формы может быть обеспечена по двум схемам: за счет образования натяга в соединении или путем пластической деформации одной из деталей в неровности типа канавок, шлицов, пазов или отверстий, выполненных на сопрягаемой поверхности неподвижной детали. Во втором случае прочность обеспечивается главным образом за счет геометрического замыкания соединяемых деталей [3].

Первая схема используется при соединении металлических деталей с неметаллическими, а также в качестве подготовительной операции в процессах пайки. Магнитно-импульсная сборка не требует точной предварительной подгонки соединяемых деталей. На-

личие начального зазора между сопрягаемыми поверхностями порядка 0,5 мм практически не сказывается на величине натяга между деталями [3]. Примеры узлов, собранных за счет натяга в соединении, показаны на рис. 4.1.



Рис. 4.1 – Узлы, собранные за счет натяга в соединении

Сборка металлических деталей с хрупкими основаниями отличается узким диапазоном допускаемых импульсных нагрузок. Только силовое воздействие на деформируемую деталь не обеспечивает необходимого качества сборки [18]. Необходимая величина натяга в соединении обеспечивается за счет силового и термического воздействия на деформируемую деталь. Эффективной технологией сборки за счет контролируемого натяга является разработанная технология запрессовки медной рубашки охлаждения в стальной корпус рулевых и маршевых ЖРД перед пайкой. Разработанная технология настолько эффективна, что практически полно-

стью устранила дефекты по «непропаю», обеспечив надежность ракетных двигателей. На рис. 4.2 показаны собранные перед пайкой корпуса ЖРД.



Рис. 4.2 – Собранный с помощью ИМП камера ЖРД

Наибольшей прочностью и надежностью обладают сборочные соединения с геометрическим замыканием соединяемых деталей. Геометрическое замыкание может быть обеспечено путем совместной пластической деформации соединяемых деталей или за счет затекания деформируемой детали в канавки, отверстия и другие неровности на поверхности неподвижной детали [19, 20].

Узлы, собранные путем геометрического замыкания, представлены на рис. 4.3.



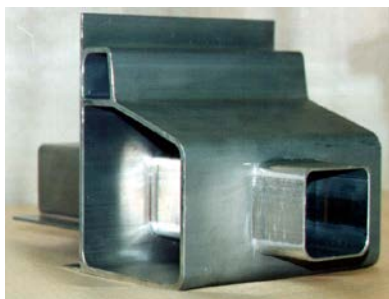
a



б



в



г

Рис. 4.3 – Узлы, собранные с использованием технологии магнитно-импульсной сборки с геометрическим замыканием соединяемых деталей:
a – биметаллический заземлитель; *б* – карданный вал автомобиля;
в – узлы силовых конструкций; *г* – сборка продольных и поперечных рам спортивного автомобиля

Процесс также позволяет собирать шланги и рукава с концевой арматурой. Полученные соединения надежно работают при давлениях до 100 МПа [21]. Использование магнитно-импульсной технологии позволяет улучшить качество и внешний вид соединений, а также повысить производительность по сравнению со сборкой в кулачковых штампах.

Еще одной эффективной областью использования процесса является сборка изделий, изготовленных из проволоки, типа проводов, кабелей и тросов, между собой или с металлическими законцовками [3,22]. Соединение наконечников с кабелем или проводом, представленное на рис. 4.3, *a*, осуществляется путем обжима

цилиндрической части наконечника на кабель. При сборке кабеля с наконечником происходит пластическая деформация медных или алюминиевых проводников, в результате которой они приобретают характерную шестигранную форму, вследствие чего коэффициент заполнения металлом поперечного сечения деформируемой части наконечника становится близким к единице. Это приводит к снижению электрического сопротивления контактного соединения до уровня в 1,2...1,4 раза ниже предельного значения, допускаемого техническими условиями на изделие, а усилие срыва наконечника не менее чем в 1,5 раза превосходит минимально допустимую величину [23].



Рис. 4.4 – Сборочные соединения деталей из проволоки:
а – электрожгуты с наконечниками; *б* – страховочный трос альпиниста

Сборка страховочного троса, который показан на рис. 4.4, *б*, осуществляется путем обжима втулки на петлю троса. Соединения троса диаметром 4 мм, полученные с помощью втулки из алюминиевого сплава АМг6 длиной 15 мм и толщиной стенки 3 мм, выдерживали растягивающую нагрузку 14 кН при требуемой испытательной нагрузке 12 кН [24].

Процесс магнитно-импульсной сборки обладает высокой производительностью и не требует точной подгонки соединяемых деталей [25].

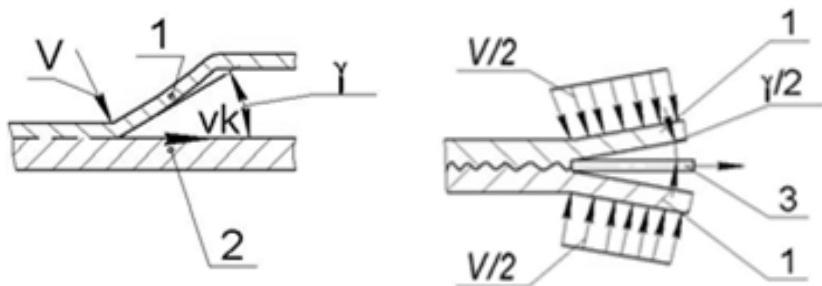
5 МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Магнитно-импульсная сварка [26-28] относится к методам соединения металлов в условиях высокоскоростного соударения, то есть к той же группе, что и сварка взрывом [29] и электрогидроимпульсная сварка [30]. Имея общий механизм образования соединения, магнитно-импульсная сварка обладает рядом специфических особенностей, которые следует учитывать при разработке технологии соединения деталей.

Высокоскоростное соударение соединяемых материалов может быть обеспечено за счет разгона одной из свариваемых заготовок, которая называется метаемой, или путем их встречного метания (так называемая симметричная схема сварки). На рис. 5.1 представлен процесс соударения свариваемых заготовок при импульсных методах сварки по схеме одностороннего *a* и встречного *b* метания свариваемых заготовок [3].

В результате экспериментальных исследований установлено [31], что сварное соединение образуется в определенной области параметров соударения. Например, область сварки для меди показана на рис. 5.2.

Сварное соединение образуется за счет совместной пластической деформации соударяющихся материалов. Кумулятивная струя обеспечивает удаление адсорбированных и окисных пленок с соударяющихся поверхностей.



а

б

Рис. 5.1 – Схема соударения свариваемых заготовок:

1 – метаемая заготовка; 2 – неподвижная заготовка; 3 – кумулятивная струя

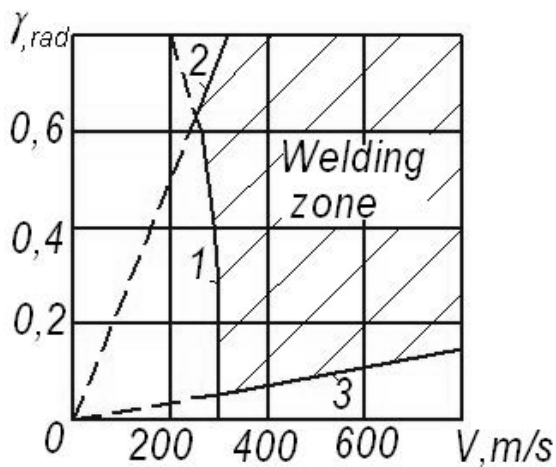


Рис. 5.2 – Область сварки для медных сплавов

Для образования сварного соединения скорость соударения свариваемых заготовок должна превышать критический для данного материала уровень V_{\min} . Это условие описывается линией 1 на рис. 5.2. При этом фронт контакта должен перемещаться со скоростью, не менее чем вдвое превышающей значение V_{\min} (линия 2 на рис. 5.2), но меньшей скорости звука C в свариваемом материале (линия 3 на рис. 5.2) [32].

Магнитно-импульсная сварка позволила получать соединения деталей в однородном и разнородном сочетании материалов (X18H10T+AMг6, Cu+Al и др.), примеры таких деталей показаны на рис. 5.3 [33].



Рис. 5.3 – Сваренные детали двигателей и холодильных агрегатов из однородных и разнородных материалов

На рис. 5.4 показан электронный прибор – тиристор таблеточного типа и микрошлиф зоны сварки.

Манжеты тиристора, изготовленные из меди толщиной 0,5 мм и покрытые никелем, сварены по схеме встречного метания. На микрошлифе видно, что в сварном шве остался слой никеля. Поэтому соединение обладает высокой коррозионной стойкостью.

На рис. 5.5 показан конденсатор, герметизированный магнитно-импульсной сваркой.

Герметизация тиристора и конденсатора является заключительной операцией при изготовлении данных приборов.



Рис. 5.4 – Тиристор таблеточного типа, полученный с помощью магнитно-импульсной сварки

На рис. 5.6 показан фрагмент нефтепроводной трубы с протекторными кольцами, установленными магнитно-импульсной сваркой.



Рис. 5.5 – «Косинусный» конденсатор электротехнического производства



Рис. 5.6 – Сварной стык нефтепромысловых труб с приваренными с помощью ИМП протекторными кольцами

Испытания экспериментального участка трубопровода изготовленного с применением магнитно-импульсной технологии, подтвердили высокое качество антикоррозионной защиты зоны труб, прилегающей к сварному стыку.

При изготовлении деталей и узлов различного назначения используется совмещение магнитно-импульсных технологий, например: резки и калибровки, резки и формовки, резки и сборки и других.

Примером совмещения операции формовки и сварки могут служить полученные с их помощью корпуса электросоединителей бортовых кабелей ракетно-космической техники (рис. 5.7) [34].

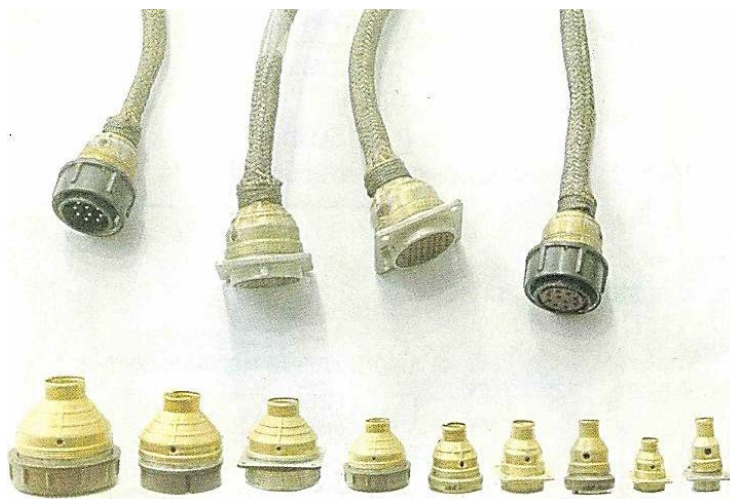


Рис. 5.7 – Корпуса электросоединителей бортовых кабелей ракетно-космической техники

Корпуса, изображенные на рис. 5.7, изготавливали из алюминиевой фольги толщиной 0,15 мм. Такая продукция используется в бортовых системах 10 типов ракетной техники.

Только для ракеты одного типа достигнуто снижение веса не менее чем в 17 раз, уменьшение габаритных размеров в 1,5–2 раза.

6 РАЗРАБОТКА ГИБРИДНЫХ И КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, СОЧЕТАЮЩИХ СТАТИЧЕСКОЕ И МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЕ НАГРУЖЕНИЯ

Гибридные технологии – это технологии, в которых на обрабатываемый объект одновременно и периодически на всём протяжении производственного цикла воздействуют двумя и более источниками нагружения; комбинированные – когда во время действия одного источника другой действует однократно в начальный или конечный моменты производственного цикла [35]. Циклограммы таких процессов приведены на рис. 6.1 [36].

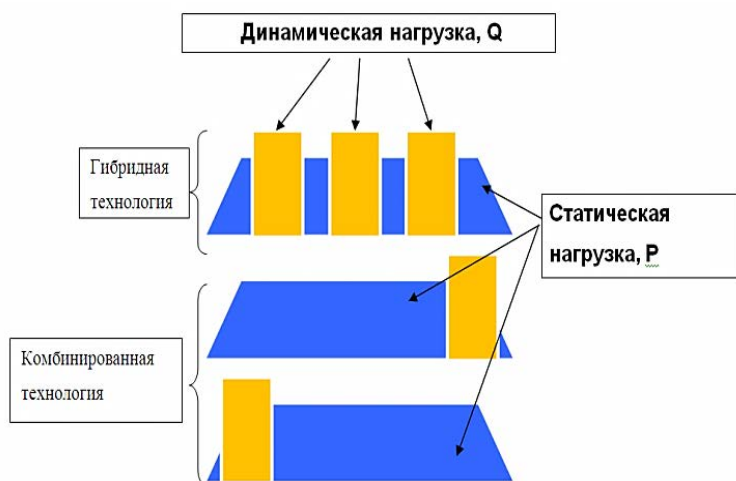


Рис. 6.1 – Циклограммы гибридных и комбинированных технологий

Впервые предложено в качестве динамической нагрузки использовать импульсное магнитное поле. Преимуществами этого динамического метода нагружения являются: бесконтактное воздействие и микро- или миллисекундный диапазон приложения нагрузки.

Разработанные гибридные и комбинированные технологии [37-39] стали возможными и востребованными благодаря значительному упрощению используемой при этом технологической оснастки, так как создание дополнительных динамических усилий не требует применения каких-либо подвижных элементов. Для реализации таких процессов в существующей технологической оснастке размещают индукторы, соединенные с магнитно-импульсной установкой.

Области применения гибридных и комбинированных технологий в машиностроении и металлургии приведены на рис. 6.2.

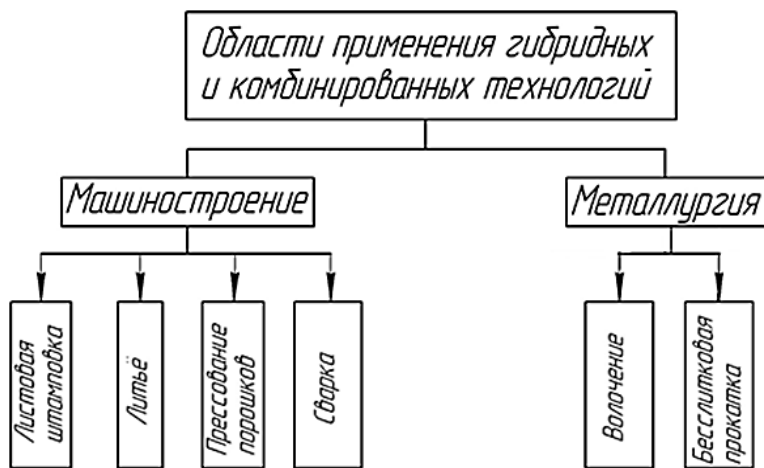


Рис. 6.2 – Области применения гибридных и комбинированных технологий

Приведенные ниже технологические схемы иллюстрируют возможности новых технологий.

В процессе вытяжки (рис. 6.3) на фланец периодически с частотой, например 1 Гц, воздействуют импульсным магнитным полем. В результате фланец как бы «повисает» между матрицей и прижимом. Снижаются силы трения, изгибные напряжения, затрудняется (предотвращается) процесс гофрообразования. Импульсные, наведенные в заготовке токи, вызывают ее нагрев и благоприятно меняют механические свойства материала.

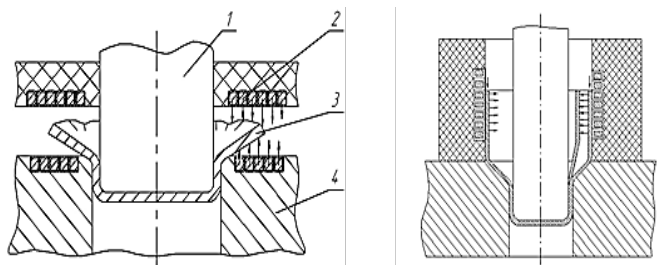


Рис. 6.3 – Схема гибридной технологии вытяжки:

- 1 – пуансон; 2 – встроенный в матрицу и прижим индуктор;
3 – заготовка; 4 – матрица

При многопереходной вытяжке воздействие импульсного магнитного поля на боковую поверхность изменяет напряженно-деформированное состояние в очаге деформации, повышая предельные значения коэффициентов вытяжки, снижая потребные усилия.

При обтяжке (рис. 6.4) листовой заготовки с целью получения оболочки двойной кривизны на заготовку одновременно со статической нагрузкой P действуют периодически динамической нагрузкой Q , создаваемой индуктором, вмонтированным в обтяжной пуансон. В результате снижаются силы трения, улучшается распределение деформации и возрастают предельные возможности процесса.

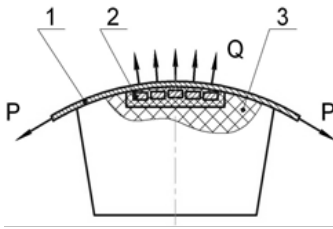


Рис. 6.4 – Схема гибридной технологии обтяжки:
 1 – заготовка; 2 – встроенный индуктор; 3 – пуансон

Отличительной особенностью комбинированной технологии «вытяжка-обрезка припуска» является сочетание двух операций в пределах одного хода прессы: вытяжки и обрезки припуска (рис. 6.5).

Реализация такой технологии стала возможной благодаря размещению в пуансоне индуктора, соединенного с магнитно-импульсной установкой, и составной матрице 2 и 7, имеющей вытяжную и обрезную части.

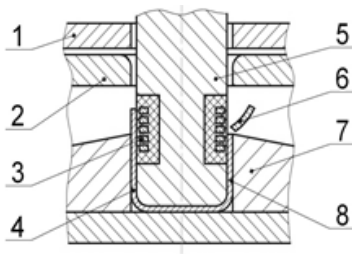


Рис. 6.5 – Схема процесса вытяжки и обрезки припуска:
 1 – прижим; 2 – вытяжная матрица; 3 – встроенный индуктор;
 4 – заготовка после вытяжки; 5 – пуансон;
 6 – обрезанный припуск; 7 – матрица; 8 – готовая деталь

Реализация комбинированной технологии «вытяжка – формовка» показана на рис. 6.6.

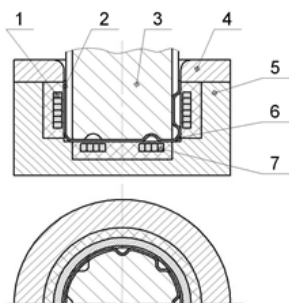


Рис. 6.6 – Вытяжка и формовка:

1 – цилиндрический индуктор; 2 – заготовка после вытяжки; 3 – пуансон; 4 – вытяжная матрица; 5 – корпус; 6 – готовая деталь; 7 – плоский индуктор

В схеме (рис. 6.6) индуктор расположен в матрице, а пуансон имеет формообразующие элементы – рифты. На заключительном этапе вытяжки, без остановки прессы, формуются ребра жесткости. Совмещаются две операции: вытяжки и формовки.

Для реализации комбинированной технологии «фальцовка» после статической гибки (формовки) борта на угол 90° осуществляют динамическую фальцовку (рис. 6.7) по всему контуру на угол 180° . Реализация такой технологии стала возможной благодаря встроенному в матрицу индуктору [40,41].

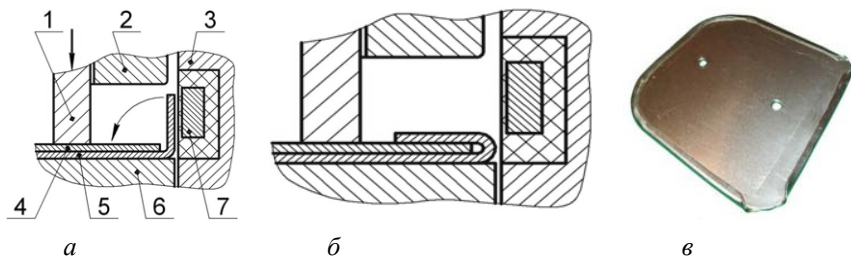


Рис. 6.7 – Комбинированная операция «фальцовка»:

а – начальная стадия процесса; б – конечная стадия процесса; в – готовая деталь; 1 – прижим; 2 – пуансон; 3 – матрица; 4 – внутренняя панель; 5 – внешняя панель; 6 – выталкиватель; 7 – индуктор

Два перехода гибки – формовки (на угол 90 и 180°) осуществляются в одном штампе за один ход пресса без его остановки.

На рис. 6.8 показана схема комбинированного процесса «гибка».

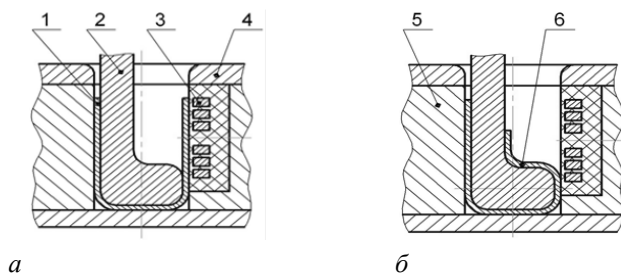


Рис. 6.8 – Схема процесса гибки (получение детали хомут):

- а* – первый штамповочный переход, статическая гибка;
- б* – второй (динамический) переход гибки; 1 – заготовка; 2 – пуансон;
- 3 – плоский индуктор; 4 – матрица; 5 – корпус; 6 – готовая деталь

За один ход пресса осуществляют П-образную гибку (рис. 6.8) и вторым переходом – гибку с помощью плоского индуктора по пуансону.

На рис. 6.9 показана схема комбинированной технологии волочения трубы.

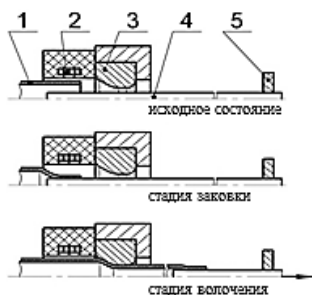


Рис. 6.9 – Схема комбинированной технологии волочения трубы:

- 1 – заготовка; 2 – индуктор; 3 – волока; 4 – оправка; 5 – съёмник

С одновременным включением волочильного стана производят магнитно-импульсную заковку конца трубы и протяжку через волоку (рис. 6.9).

Обе операции «заковка» и «протяжка» осуществляются на одном участке, одним оператором. Увеличивается производительность труда. За счет сокращения длины «заковки» происходит экономия металла. При этом также снижаются энергозатраты.

Кроме того, разработаны гибридные и комбинированные технологии, применяемые в литейном, металлургическом и сварочном производствах.

Приведенные схемы являются типовыми, возможно множество их модификаций. Предполагается дальнейшее развитие существующих технологий и разработка новых.

Исследование гибридных и комбинированных технологий потребовало создания методики моделирования статико-динамических процессов.

Для компьютерного моделирования использован программный продукт MSC NASTRAN/MSC/MARC, а предложенная схема последовательности решения поставленной задачи приведена на рис. 6.10 [42].

В методике компьютерного моделирования использован импорт векторных полей для переноса статического результата в динамическое решение (рис. 6.10).

Таким образом, напряженно-деформированное состояние как конечный результат статического деформирования (первый этап) в момент приложения динамической нагрузки принимается как начальное состояние при дальнейшем рассмотрении динамического деформирования (второй этап). Одновременно осуществляется переход со статической кривой упрочнения на динамическую (рис. 6.11).

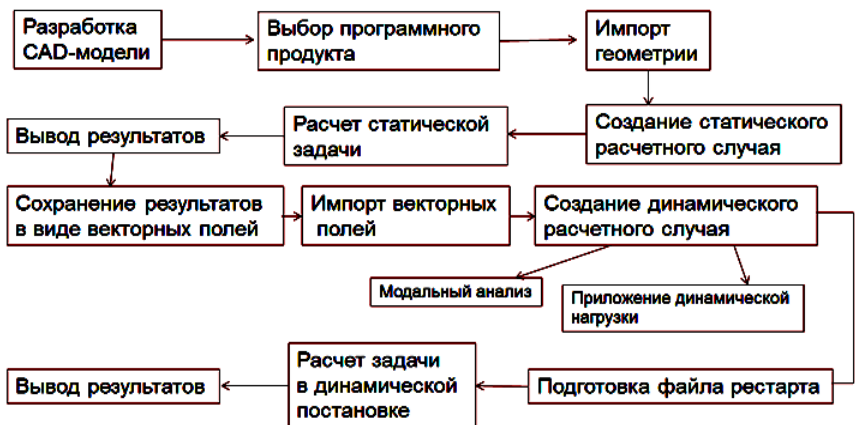


Рис. 6.10 – Схема создания комбинированного расчетного случая

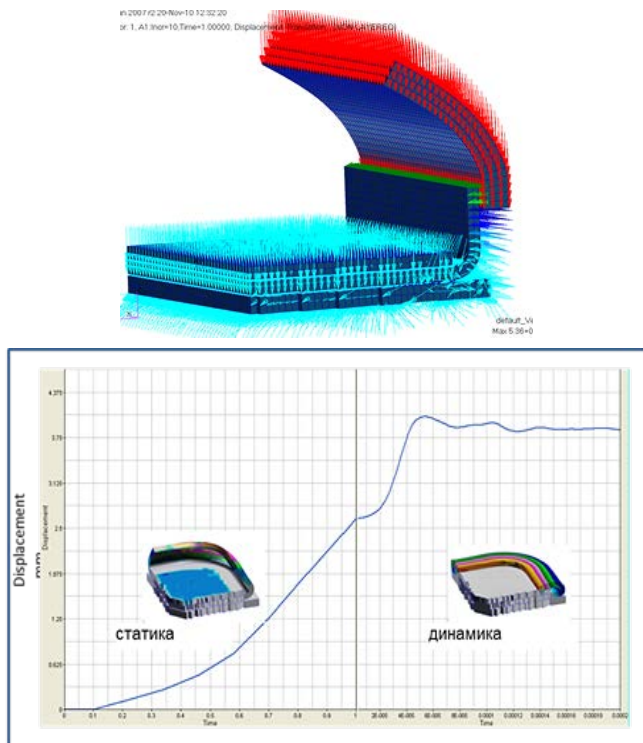


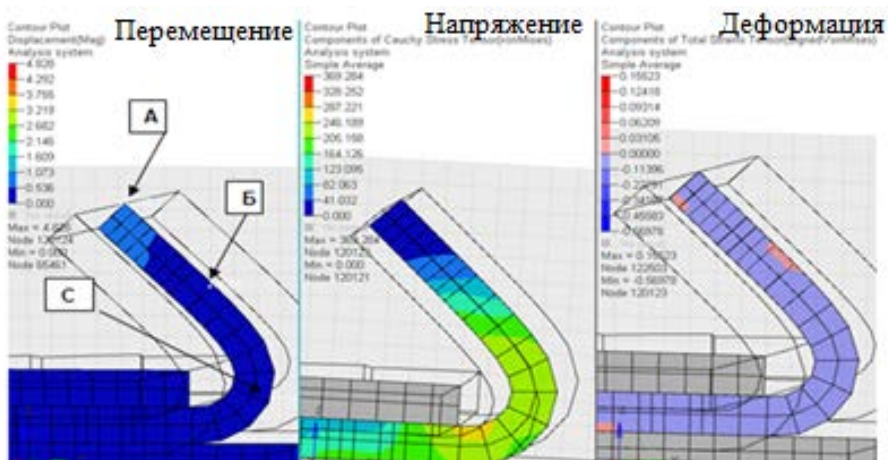
Рис. 6.11 – Совмещение статического и динамического решений

Возможности компьютерного моделирования можно проиллюстрировать на примере выполнения операции «фальцовка». Проведенное компьютерное моделирование позволило оценить напряжения и деформации в характерных точках деформируемого материала в различные моменты времени (рис. 6.12). При этом искомые напряжения и деформации увязаны с кинематикой процесса.

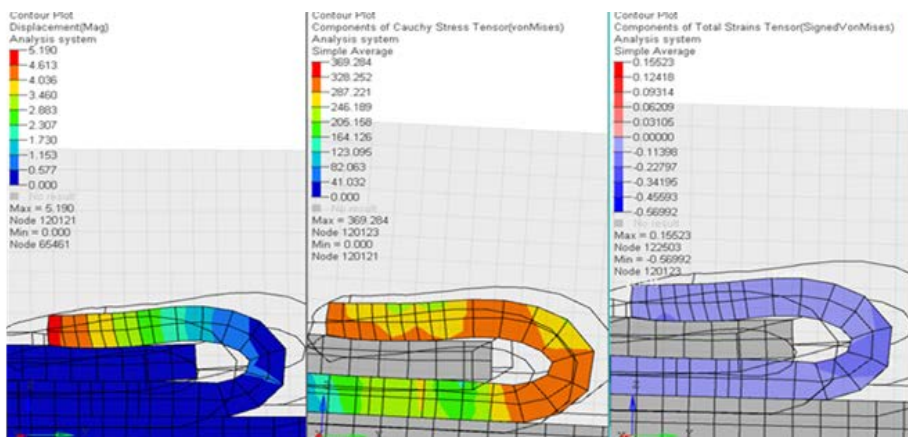
Установлено, что характер движения борта определяет напряженно-деформированное состояние его материала (рис. 6.13). Так приведенный рисунок позволяет наблюдать развитие деформаций во времени в процессах гибки и соударения борта с внутренней панелью. При избытке энергии, прикладываемой к заготовке, можно видеть течение металла вдоль борта, подсечку внутренней панели и даже отрыв борта от основного металла.

Таким образом, предложенная методика компьютерного моделирования комбинированного процесса фальцовки и проведенное с ее помощью исследование позволили оценить влияние на процесс параметров нагружения, геометрических размеров соединения, механических свойств деформируемого материала, выбрать их оптимальные значения, обеспечивающие требуемое качество сборки.

Результаты исследований позволили приступить к реализации новых технологий на производстве. Так, комбинированная технология «фальцовка» опробована при сборке панелей модели задней двери автомобиля семейства ВАЗ 2118 «Калина» (рис. 6.14).

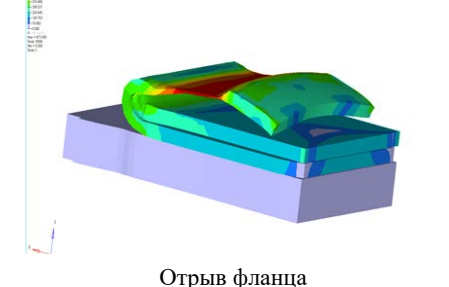
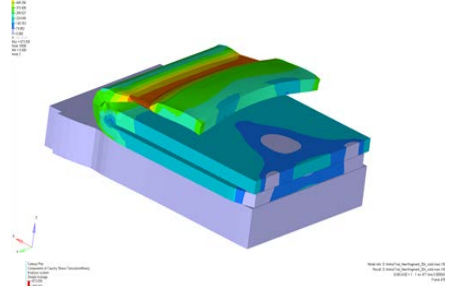
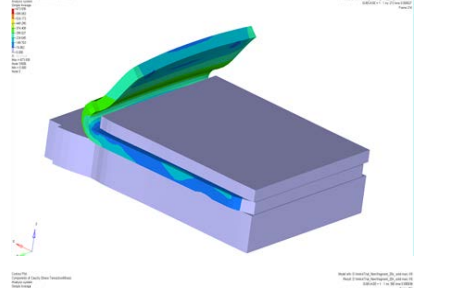
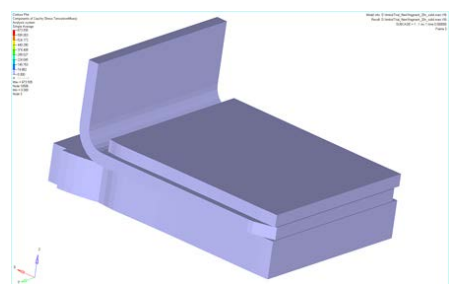
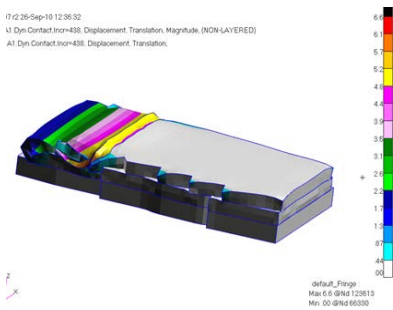
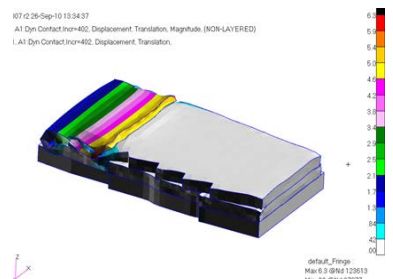
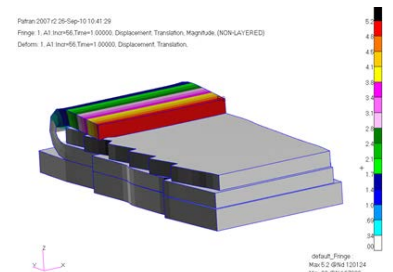
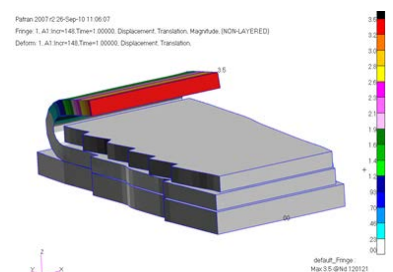


a



б

Рис. 6.12 – Примеры изменения параметров фланцевого борта во времени:
a – начальный момент времени; *б* – конечный момент времени



Отрыв фланца

a

б

Рис. 6.13 – Фрагменты перемещения (деформации) заготовки при двух формах динамического импульса: *a* – возрастающей; *б* – равномерной

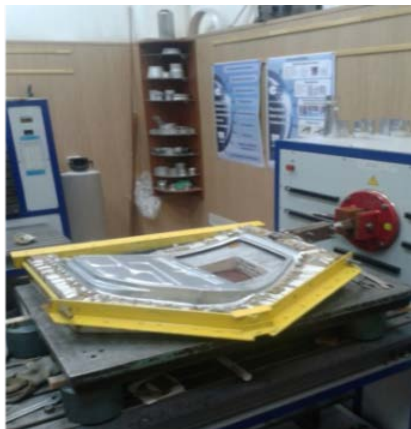
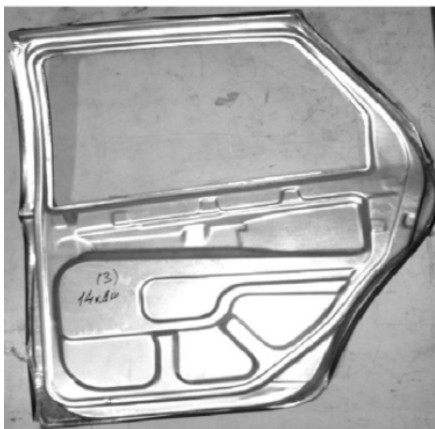


Рис. 6.14 – Модель (1:2) задней двери автомобиля семейства ВАЗ 2118 («Калина»), полученная по предложенной технологии

А для реализации комбинированной технологии «вытяжка-обрезка припуска» спроектирован, изготовлен и опробован в работе инструментальный штамп со встроенным индуктором (рис. 6.15).



а



б

Рис. 6.15 – Внешний вид штампа для реализации комбинированной технологии «вытяжка – обрезка припуска»:

а – штамп в сборе; *б* – пуансон со встроенным индуктором

Общими для всех схем являются следующие преимущества:

- повышение качества готовой продукции за счет использования динамического нагружения (высокоскоростного деформирования);

- повышение предельных возможностей ряда гибридных и комбинированных технологий как результат изменения условий деформирования, напряженно-деформированного состояния материала в очаге деформирования;

- увеличение производительности труда в результате совмещения операций;

- уменьшение количества переходов и упрощения конструкции и металлоёмкости штамповой оснастки за счет применения дополнительных неподвижных конструктивных элементов (устройств) индукторов.

7 МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РАСПЛАВЫ

В последнее время повышенное внимание уделяется исследованию различных способов воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл, позволяющих получить модифицированную структуру без введения специальных добавок – модификаторов [43]. Эффективным способом повышения качества литого металла, при одновременном снижении материальных и энергетических затрат на его изготовление, является разработка и освоение новых методов литья, основанных на использовании физических воздействий на расплав на всех этапах формирования структуры и свойств отливок.

С этих позиций одним из новых направлений МИОМ является магнитно-импульсная обработка (МИО) расплавов. Такая МИО расплава может быть использована в литейном, металлургическом и сварочном производствах, а также в процессах бесслитковой прокатки.

Установлено, что в процессе МИО расплавов возникают следующие эффекты, приводящие к формированию однородной мелкозернистой (модифицированной) микроструктуры и повышенным физико-механическим свойствам готовой продукции (рис. 7.1):

- возникающие в расплаве дополнительные внутренние источники тепла как результат протекания наведенных вихревых токов ($I_2(t)$);

- возникновение и распространение по объему расплава ударных волн напряжений ($\sigma = f(p)$);
- возникновение металлопотоков.

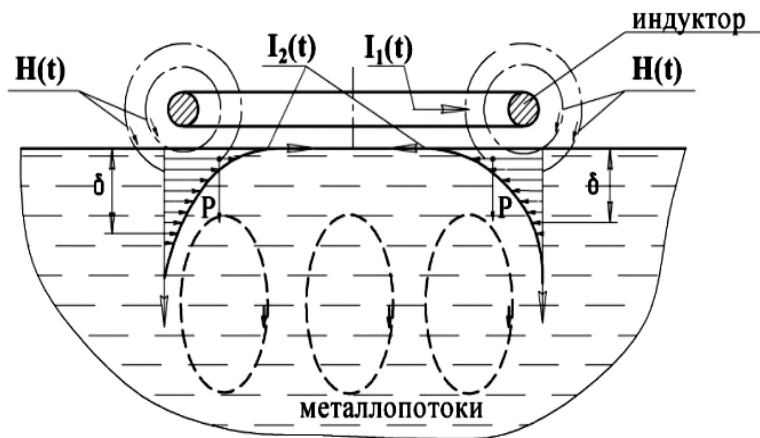


Рис. 7.1 – Схема МИО расплавов

Причем эти факторы могут быть задействованы в различные моменты времени как до (перемешивание расплавов, обработка рабочих расплавов в транспортных ковшах и раздаточных печах), так и во время процесса кристаллизации, т.е. при различном соотношении жидкой и твердой фаз.

Эти факторы определяют картину интенсивного теплосилового воздействия на структурные элементы расплавов (кластеры) и в целом меняют физику процесса кристаллизации.

Изучение физики процесса позволило разработать ряд новых технологий в машиностроении и металлургии.

7.1 Магнитно-импульсная обработка в литейном производстве

Разработано несколько технологических схем МИО расплава на этапе его приготовления (рис. 7.2), а также в процессе литья и его кристаллизации (рис. 7.3) [44].

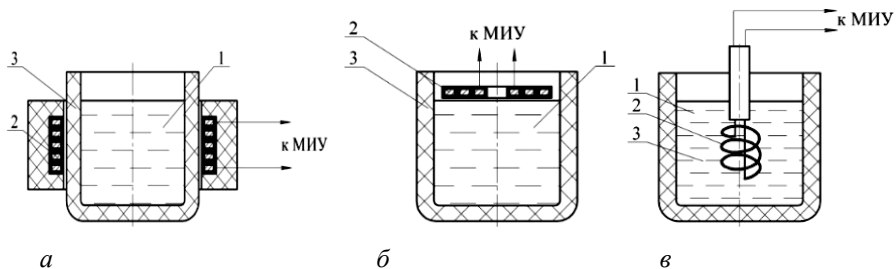


Рис. 7.2 – Технологические схемы МИО при приготовлении расплавов:
а – радиальная схема МИО; *б* – осевая схема МИО; *в* – схема МИО с погружным индуктором; 1 – расплав; 2 – индуктор; 3 – тигель

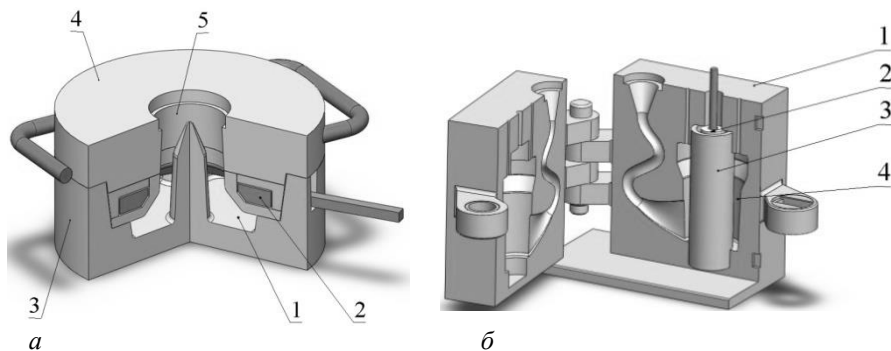


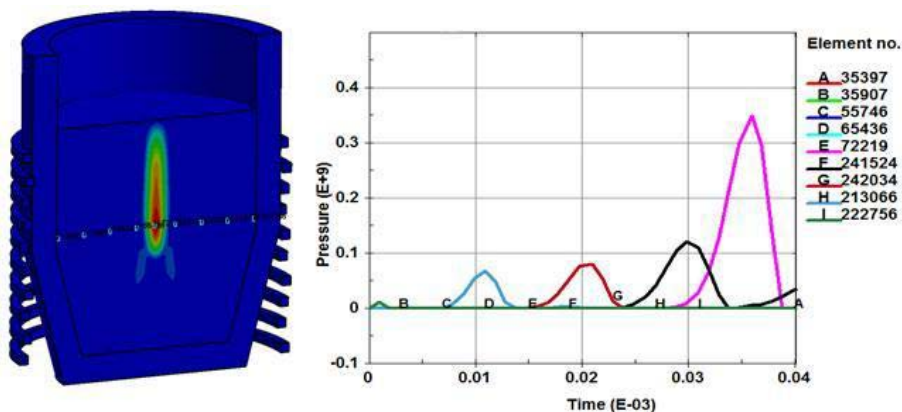
Рис. 7.3 – Варианты размещения индукторов внутри литейных форм для МИО расплавов в процессе их кристаллизации:
а – полость отливки 1; индуктор 2; нижняя 3 и верхняя 4 полуформы; заливочная горловина 5; *б* – кокиль 1; индуктор 2; полый стержень 3; полость отливки 4

Основными их особенностями и преимуществами являются:

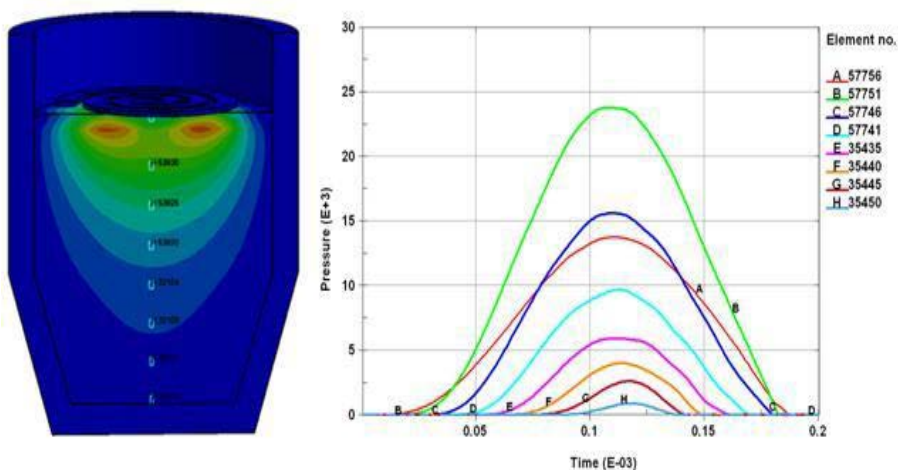
- комплексное интенсивное теплосиловое воздействие на расплавы;
- бесконтактный характер воздействия, в результате чего отсутствует вероятность загрязнения или насыщения химического состава расплава элементами материала индуктора;
- высокая точность дозирования энергии разряда;
- возможность обработки расплава сериями импульсов;
- возможность включения операции МИО расплава на любом этапе технологического процесса;
- возможность комбинирования технологической оснастки различными конструкциями индукторных систем;
- возможность обработки как больших объемов расплава, например, в раздаточном ковше с помощью погружного индуктора, так и наоборот – локальных областей путем встраивания индукторов в литейные формы;
- наличие специализированного промышленного, а не лабораторного оборудования и др.

Количественная оценка основных факторов МИО расплава проводилась в том числе с помощью компьютерного моделирования данных процессов. Характер распределения давления ИМП в расплаве в зависимости от схемы МИО показан на рис. 7.4.

Из рисунка видно, что при радиальном воздействии область наибольших концентраций давления находится в центральной зоне расплава. При осевом воздействии давление распространяется от зеркала расплава, над которым расположен индуктор, в глубину тигля. Наличие давлений вызывает ударную волну, которая способствует возникновению металлопотоков расплава [45].



a



b

Рис. 7.4 – Зависимость изменения давления ИМП от времени в характерных областях расплава при различных схемах воздействия:

a – радиальная схема воздействия; *b* – осевая схема воздействия

В результате проведенных исследований было установлено, что МИО расплавов благоприятным образом влияет на свойства и структуру сплавов. Ниже приведено несколько примеров.

Так, на рис. 7.5 приведены характерные результаты металлографических исследований сплава Al-6%Si, подвергнутого МИО ($W = 0,56$ кДж; $n = 3$ шт.) в сравнении с контрольным образцом [46].

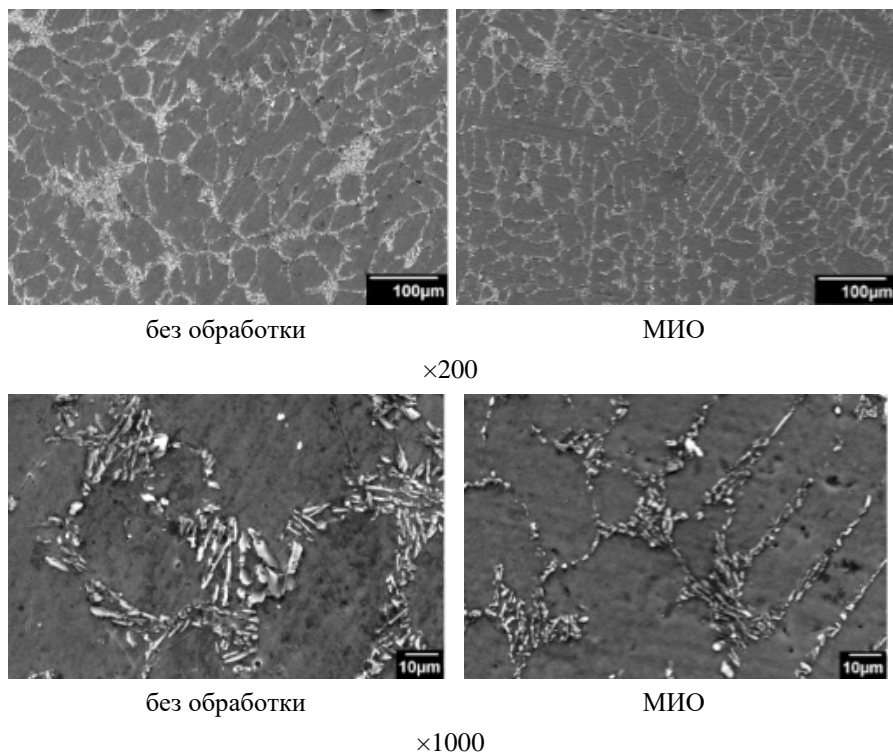


Рис. 7.5 – Микроструктура сплава Al-6%Si

Анализ микроструктуры сплава Al-6%Si показал, что МИО расплава приводит к формированию однородной мелкозернистой микроструктуры, при этом также значительно измельчается эвтектика на границах зёрен. Полученная мелкозернистая микроструктура приводит к повышению механических свойств сплава.

Наибольший прирост свойств составил для предела прочности 27%, для относительного удлинения – 136%.

Другим примером являются результаты МИО расплава промышленного сплава АК6М2. В табл. 7.1 приведен порядок отбора проб.

Таблица 7.1 – Порядок отбора проб при обработке расплава АК6М2 [46]

№ пробы	Операция
1	Перегрев расплава до 750+100°C, сьем шлака, перемешивание
2	МИО расплава, выдержка после обработки 2 мин
3	Обработка расплава флюсами «FNK-A» и «Degazer»
4	Повторная МИО расплава. Выдержка после обработки 60 мин

Анализ полученных результатов металлографических исследований структуры сплава АК6М2 (рис. 7.6) показал, что непосредственно после МИО (проба 2) произошло наиболее значительное измельчение основных структурных составляющих: средний размер дендритов α -Al уменьшился на 23%, кристаллов Si_e – на 10%. При этом количество данных фаз увеличилось в 1,7 и 1,23 раза соответственно. Последующие рафинирование и дегазация расплава несколько снизили эффект от МИО (проба 3). Это, вероятно, связано с тем, что вместе с удалением нерастворимых неметаллических включений из расплава частично удаляются и унаследованные центры кристаллизации, что и вызывает укрупнение структурных составляющих в твердых сплавах [45]. Изменение структуры благоприятно отражается на значениях механических свойств. Так, непосредственно после МИО предел прочности и относительное удлинение увеличились на 26% (проба 2).

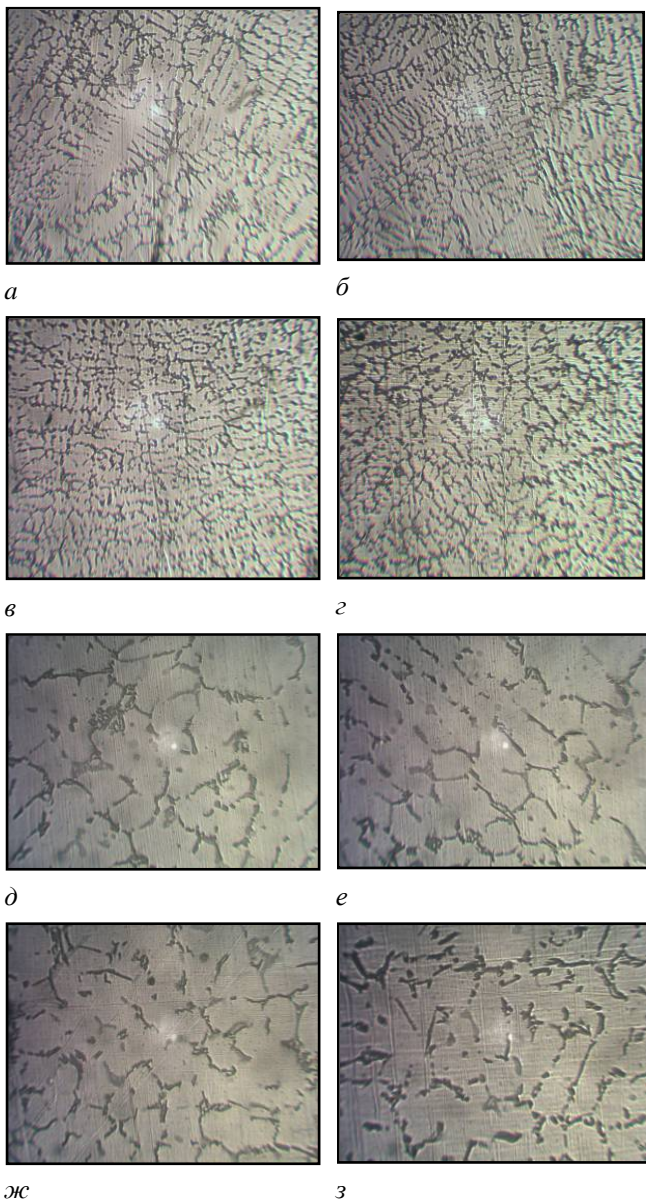


Рис. 7.6 – Влияние МИО на микроструктуру сплава АК6М2:
a-г – дендриты α -Al ($\times 100$); *д-з* – кристаллы Si_6 ($\times 500$);
a, д – проба 1; *б, е* – проба 2; *в, ж* – проба 3; *г, з* – проба 4

Следует отметить, что эффект от обработки сохранялся практически на протяжении 1 часа (проба 4).

Еще одним примером могут служить результаты МИО расплава лигатурного сплава Al-20%Si. Так, на рис. 7.7 показаны фрагменты микроструктуры лигатур Al-20 масс.%Si в зависимости от способа обработки [47].

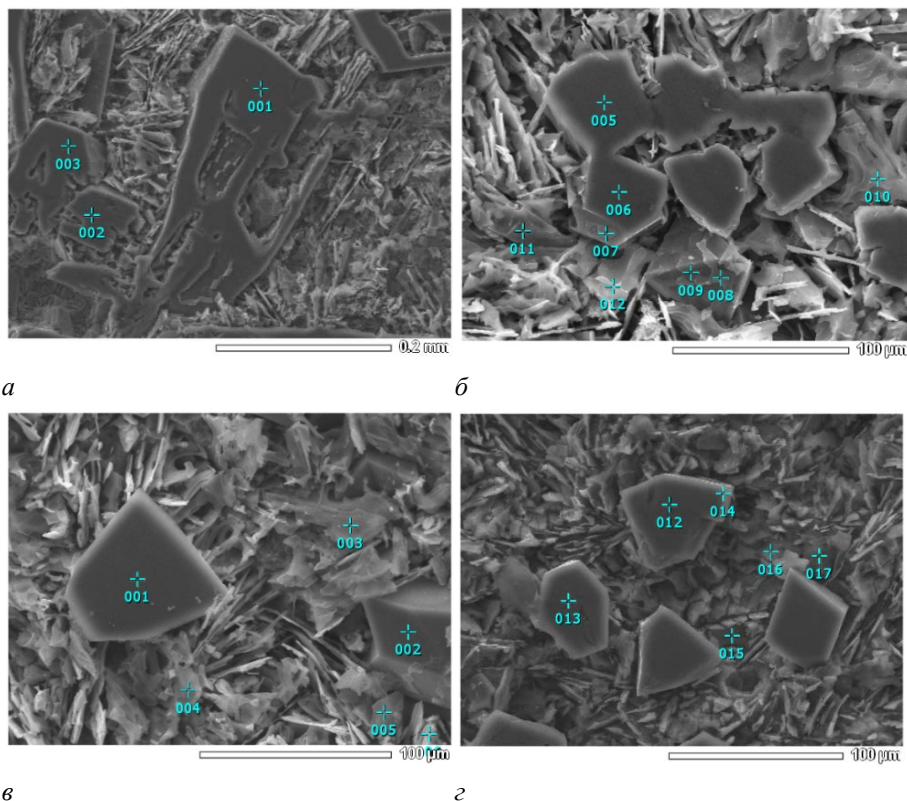


Рис. 7.7 – Влияние количества импульсов при МИО с энергией разряда 1,5 кДж на параметры кристаллов первичного кремния в лигатуре Al-20 масс.%Si: *a* – без МИО; *б-г* – 1, 2, 3 импульсов соответственно

Из представленных результатов видно, что с увеличением количества импульсов при МИО происходит не только уменьшение размеров кристаллов Si_n , но и изменение их морфологии с разветвленной на ограниченную. С учетом того, что затвердевание лигатурных расплавов происходило в одинаковых условиях, установленный факт можно в большей степени отнести на счет действия магнитно-импульсных полей, интенсифицирующих процессы твердофазного диспергирования. Локальный микрорентгеноспектральный анализ кристаллов первичного Si_n показал, что с увеличением количества импульсов при МИО лигатурных расплавов происходит увеличение содержания алюминия в кремниевых кристаллах (рис. 7.8). Это может быть связано с тем, что магнитно-импульсная обработка способствует расширению микротрещин в частицах кремния и улучшению смачивания их поверхностей [48].

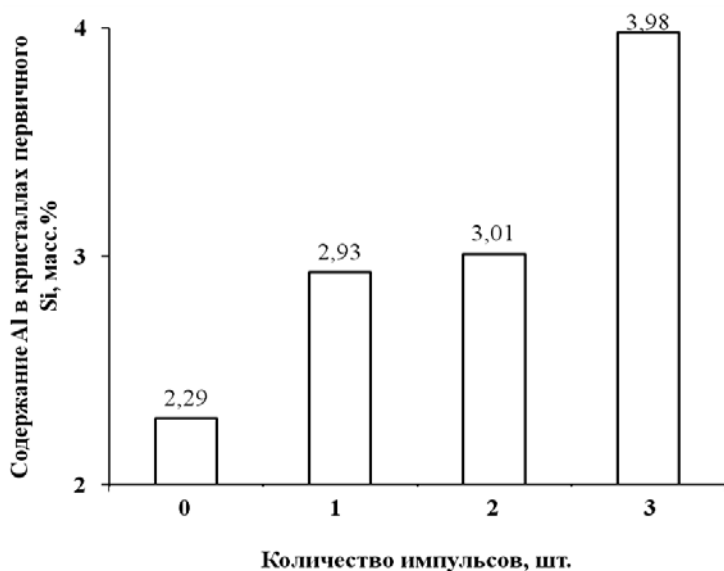


Рис. 7.8 – Влияние количества импульсов при МИО на содержание Al в кристаллах Si_n

С увеличением количества импульсов разряда при МИО происходит не только уменьшение размеров кристаллов первичного кремния Si_p , но и изменение их морфологии с разветвленной на ограниченную. Такие изменения в микроструктуре также привели к значительному росту механических свойств сплава Al-20%Si.

Кроме того, установлено, что МИО расплава приводит не только к формированию однородной микроструктуры и повышенным механическим свойствам, но также и к значительному повышению литейных (технологических) свойств, таких как смачиваемость, жидкотекучесть (рис. 7.9) и усадка сплавов.



Рис. 7.9 – Комплексная проба Нехендзи-Купцова и полученные с ее помощью на разных режимах пробы из сплава АК9ч

Анализ полученных результатов свидетельствует о значительном повышении жидкотекучести (более 20%) и снижении линейной усадки с 1,2 до 0,7% при оптимальных параметрах МИО расплава. Это, в свою очередь, способствует повышению формозаполняемости и возможности получения более точных тонкостенных отливок со снижением трудоемкости дальнейшей механической обработки.

В промышленных условиях ПАО «Кузнецов» была опробована технология МИО рабочего расплава сплава АК9ч и получения из него отливки типовой детали (рис. 7.10).



Рис. 7.10 – Опытная партия отливок типовой детали, полученных с применением технологии МИО расплава на этапе его приготовления

Опробованная технология позволила получить опытные отливки типовой детали с модифицированной микроструктурой и повышенными механическими характеристиками по сравнению с традиционной технологией литья.

В интересах АО «АвтоВаз» была разработана и опробована технология МИО расплава сплава АК6М2 в раздаточной печи. В результате было установлено, что:

- обеспечение модифицированной структуры, полученной благодаря МИО расплава, способствует повышению в литом состоянии предела прочности с 187 до 237 МПа, относительного удлинения – с 5,7 до 7,2%;
- для технологического процесса в ПАЛ АО «АвтоВАЗ» МИО расплавов наиболее эффективно использовать в качестве финишной операции перед началом литья в раздаточной печи.

В промышленных условиях АО «РКЦ «Прогресс» совместно с ФГУП НПО «ТЕХНОМАШ» была опробована технология МИО расплава непосредственно в литейной форме также на примере отливки типовой детали (рис. 7.11).



Рис. 7.11 – Опытная партия отливок типовой детали, полученных с применением технологии МИО расплава в литейной форме

Опробованная технология также позволила получить опытные отливки «Корпус» с модифицированной микроструктурой и повышенными механическими характеристиками.

Кроме этого, на АО «РКЦ «Прогресс» была опробована технология повышения стойкости свинцово-цинковых штампов путем МИО расплава. В результате апробации было установлено, что данная технология приводит к повышению прочностных характеристик (в 2–2,5 раза) в поверхностных слоях матрицы штампа. Это обеспечило повышение стойкости оснастки и точности получаемых изделий.

7.2 Магнитно-импульсная обработка в прокатном производстве

С целью интенсификации процесса бесслитковой прокатки была разработана технология прокатки с одновременной МИО расплава (рис. 7.12) [48].

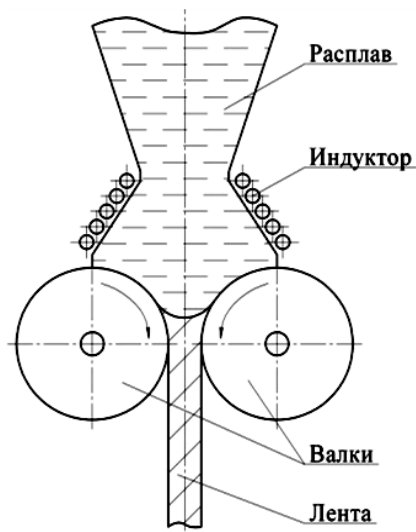
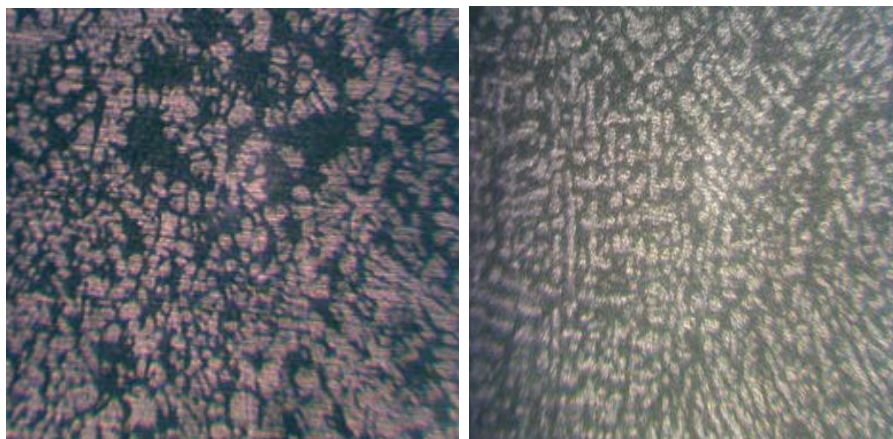


Рис. 7.12 – Технологическая схема прокатки жидкого металла с одновременным воздействием на него ИМП

Для этого был изготовлен валковый кристаллизатор со встроенной индукторной системой, подключаемой к МИУ. Причем для реализации различных технологических схем предусмотрена возможность замены индукторов. Данная технология позволяет формировать соответствующие микроструктуру и физико-механические свойства ленты для ее последующей пластической деформации. Так, анализ микроструктуры полученных литых образцов из сплава Al-11%Si показал, что МИО позволяет получить однородность структуры по всему сечению и эвтектику зернистого типа. В литом состоянии средний размер дендритов α -Al составил без МИО – 21 мкм, после МИО – 9 мкм (рис. 7.13) [49].



a



без МИО



МИО ($W=1$ кДж)

b

Рис. 7.13 – Микроструктура и внешний вид полученных образцов после прокатки со степенью деформации 50%: *a* – структура опытных образцов; *b* – внешний вид опытных образцов после прокатки

У образцов без обработки наблюдается их растрескивание и расслоение вплоть до полного разрушения. Образцы, полученные путем МИО расплава в процессе бесслитковой прокатки, имеют геометрически правильную форму с частичным растрескиванием боковых кромок.

7.3 Магнитно-импульсная обработка в металлургии

Металлургия цветных металлов – одна из наиболее энергоемких отраслей промышленности. Так, энергозатраты при получении 1 тонны алюминия или магния составляют от 13 до 18 тыс. кВт·ч [50]. При этом сила тока в современных электролизерах достигает уже 500 кА. Подвод электроэнергии к аноду промышленного электролизера, представляющему собой графитовый блок, как правило, выполняется в виде прижимного контакта, в котором медная шина крепится с помощью болтов к головке графитового анода. Однако усилие прижима из-за недостаточной прочности графитового материала ограничено, что не позволяет обеспечить низкое переходное сопротивление по границе раздела «металл–неметалл». В результате в узлах токоподвода, в том числе из-за ослабления прижима контактов и их окисления, теряется до 15–20% электроэнергии. Уменьшение переходного сопротивления на 1 мкОм только в сети одного электролизера, работающего на силе тока 175 кА, дает возможность экономии до 270 тыс. кВт·ч/год.

Для решения данной задачи было разработано техническое решение, суть которого состоит в следующем. В зоне подвода тока в углеграфитовом блоке предварительно формируются каналы, в которые под воздействием ИМП нагнетается и кристаллизуется расплав, образуя электроконтактные пробки (ЭКП) (рис. 7.14).

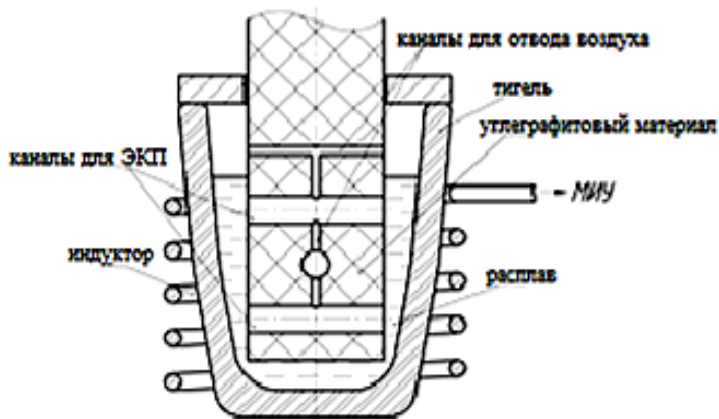


Рис. 7.14 – Технологическая схема формирования ЭКП

В результате экспериментальных исследований было установлено, что предлагаемая технология позволяет снизить в 1,5-2 раза переходное электрическое сопротивление токоподвода за счет значительного увеличения реальной площади контакта, путем проникновения металлического расплава в микротрещины углеродистого блока под действием давления ИМП [51].

7.4 Магнитно-импульсное воздействие на сварочный шов

С целью повышения качества сварного шва разработана комбинированная технология сварки плавлением с одновременным воздействием ИМП на металл сварочной ванны (рис. 7.15) [52].

Данная технология заключается в следующем. При включении сварочного агрегата электрическая дуга образует сварочную ванну расплавленного металла свариваемых деталей.

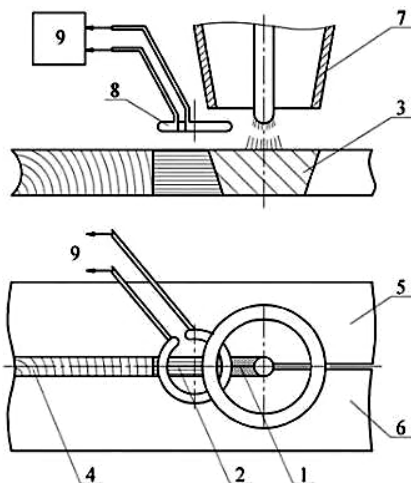
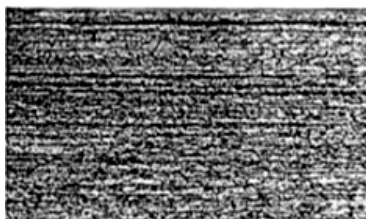


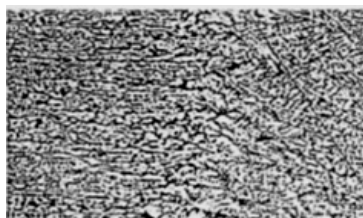
Рис. 7.15 – Технологическая схема воздействия ИМП на расплав сварного шва: 1 – зона расплавления соединяемых металлов; 2 – зона затвердевания металла; 3 – зона расплавленного металла; 4 – зона полного затвердевания металла; 5, 6 – свариваемые элементы; 7 – сварочная головка; 8 – индуктор; 9 – МИУ



поперечное сечение (x7)



основной металл (x200)



околошовная зона (x200)



сварной шов (x200)

Рис. 7.16 – Сварка плавлением с воздействием ИМП ($W=0,92$ кДж)

Одновременно с этим включается МИУ. Батарея конденсаторов периодически разряжается на индуктор, расположенный позади сварочной головки. Возникающее вокруг него ИМП воздействует на расплав металла сварочной ванны.

В результате апробации данной технологии в условиях АО «РКЦ «Прогресс» было установлено, что воздействие ИМП на расплав сварочной ванны способствует формированию более плотной структуры сварного шва (рис. 7.16), приводит к значительному снижению его балла пористости, а также к снижению уровня остаточных напряжений.

8 ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ. МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЕ УПЛОТНЕНИЕ ПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ

В изделиях машиностроительной промышленности всё большее применение находят композиционные материалы [53]. Среди них особую группу составляют волокнистые композиционные материалы (ВКМ), например «Алюминий–вольфрам–бор» (Al-W-B), обладающий высокой удельной прочностью.

Из такого материала изготавливают силовые элементы аэрокосмической техники, строительных конструкций. Возникает задача утилизации таких материалов. Причем она возникает ещё на этапе производства изделий при изготовлении препрегов, утилизации брака.

Одно из решений задачи утилизации изделий из ВКМ «Al-W-B» – резка изделий на фрагменты, их дробление на роторных или щековых дробилках, измельчение в дезинтеграторе до порошковой композиции, уплотнение, спекание порошка, получение новых изделий (рис. 8.1).

Получение порошковой композиции осуществлялось в следующей последовательности.

Предварительное дробление исходного материала выполнено с помощью щековой дробилки до размера частиц не более 200×45×4,0 мм. Эта стадия характеризуется сохранением целостности связи волокон и матрицы.

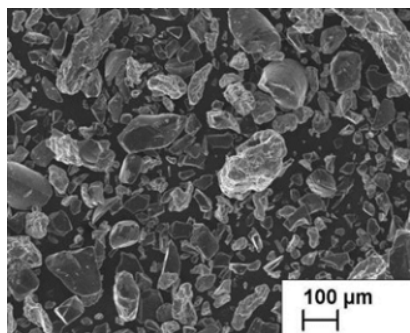


Рис. 8.1 – Последовательность операций «от утилизации ВКМ до новых изделий»

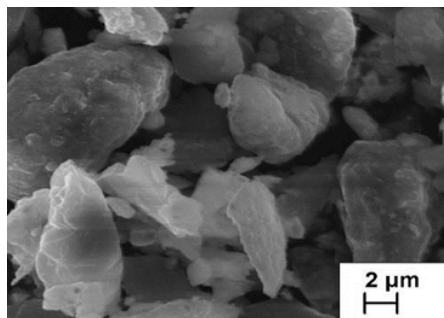
Промежуточное измельчение раздробленных пластин осуществлялось в дезинтеграторе DS-A3 с 4-рядным ротором в режиме кратного прямого измельчения. Средний размер частиц при этом достигал размеров ~ 130 мкм. На этой стадии борное волокно отделяется от алюминиевой матрицы, происходит продольное разрушение волокон и отделение оболочки В от W нитей.

Окончательный тонкий помол выполнен на лабораторном дезинтеграторе-сепараторе DSL-175 в режиме инерциальной «JS» и центрифугальной «CC» сепарации до размера частиц 1-35 мкм. Компоненты раздроблены, разделены друг от друга и уменьшены в размере.

Микроструктуры материала на заключительных стадиях измельчения приведены на рис. 8.2.



a



б

Рис. 8.2 – Фрагменты композита Al-W-B после измельчения:

a – промежуточное измельчение раздробленных пластин;

б – окончательный тонкий помол

Для получения длинномерных изделий предложена и исследована так называемая гибридная технология прессования порошков, сочетающая статическую продольную (волочение) и динамическую радиальную (магнитно-импульсный обжим) нагрузки (рис. 8.3). Действие динамической нагрузки осуществляется периодически с частотой следования импульсов 1-2 с.

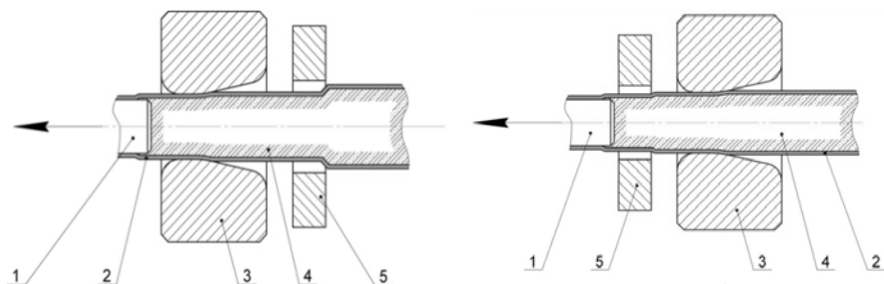


Рис. 8.3 – Схемы гибридных технологий прессования порошков:

1 – заглушка; *2* – труба; *3* – волокна; *4* – порошок; *5* – индуктор

Приведенные на рис. 8.3 схемы отличаются местом расположения индуктора: до или после волокна. Различное расположение индукторов меняет схему напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при волочении. Продольное и радиальное деформирование меняет механизм уплотнения порошка.

Изменение геометрических размеров образцов после волочения и после магнитно-импульсного обжима приведено в табл. 8.1, а микрошлифы образцов после спекания – на рис. 8.4.

Таблица 8.1 – Параметры образцов после волочения и обжима

№	До волочения		После волочения	Объём порошка в контрольной части, % к исходному объёму		После магнитно-импульсного обжима	
	D_0 , мм	L_0 , мм	D_1 , мм	L_1 , мм		W , кДж	$D_{кон.}$, мм
Волока Ø 17мм							
1				52,4		3,8	16
2	17,9	50	17	52,3	93,1	5,3	15,7
3				52,3		7,1	15,4
Волока Ø 16мм							
4				57,7		3,8	15,7
5	17,9	50	16,2	57,7	91	5,3	15,4
6				57,7		7,1	15,0

Полученные результаты экспериментов позволяют высказать предварительные соображения по статико-динамическому уплотнению порошка. При волочении частицы порошка приобретают направленную продольную деформацию, вытягиваются в направлении продольной силы. Происходит уплотнение алюминиевой фазы. Однако между частицами остаются поры, снизить количество которых возможно радиальной деформацией под действием дина-

мической нагрузки. При этом наночастички порошка искажаются (деформируются) в направлении залечивающихся пор и даже дробятся. Это приводит к окончательной плотной их упаковке. Достигнутая в экспериментах плотность составляет 94-96% [54].

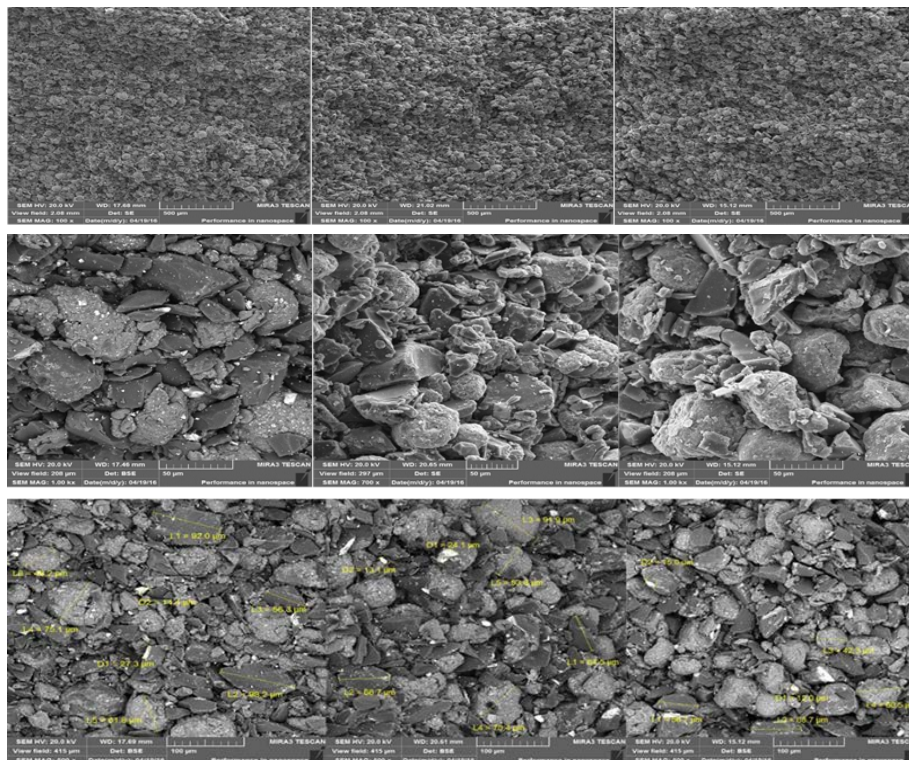


Рис. 8.4 – Микроструктура образцов композиции Al-W-B после спекания

Учитывая высокую твёрдость бора, из порошковых образцов получен шлифовальный инструмент. С другой стороны, высокая способность поглощать бором нейтронное излучение открывает возможность использования полученного материала в конструкциях защиты от радиации.

9 ФОРМИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В связи с интенсивным развитием высокоскоростных методов пластического деформирования задача определения предельных значений деформаций листового металла в результате его динамического нагружения является актуальной.

I. В связи с этим были разработаны и исследованы способы динамического испытания листовых металлов и соответствующее технологическое оснащение для их реализации. Способы позволяют получать различные скорости перемещения заготовки от 20 до 150 м/с [55].

В качестве примера на рис. 9.1 приведены изображения образцов, полученных с помощью одного из способов испытания.

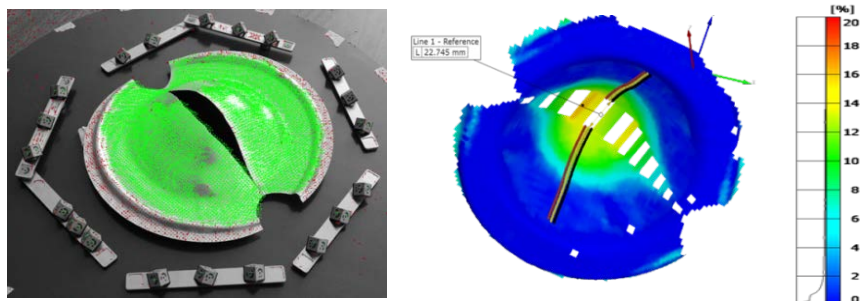


Рис. 9.1 – Образцы после испытания и элементы их обработки с помощью системы анализа изображений

В результате подобного анализа различных образцов были получены FLD-диаграммы для статического и динамического нагружений (рис. 9.2).

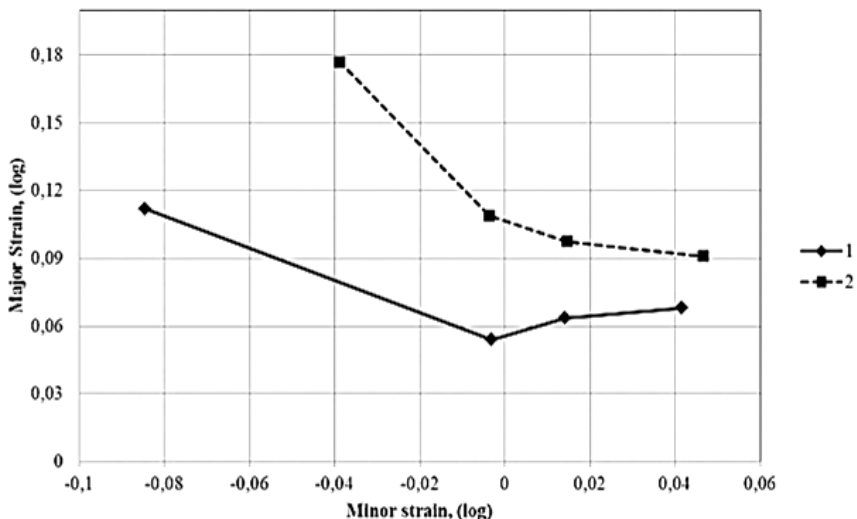


Рис. 9.2 – Полученные FLD-диаграммы:

1 – статическое испытание, 2 – динамическое испытание

Как видно из представленных на рис. 9.2 данных, с повышением скорости протекания процесса (скорости деформации) наблюдается существенное увеличение предельных деформационных возможностей материала. Данные диаграммы использованы для получения предельных характеристик листового металла при компьютерном моделировании и разработке новых технологических процессов МИОМ.

II. Большой интерес представляют проведенные исследования по повышению ударной вязкости под воздействием ИМП, что открывает возможность повышения усталостной прочности, предот-

вращения мгновенного усталостного разрушения. Такие экспериментальные работы проводились совместно с АО «РКЦ «Прогресс» [56].

Механизм воздействия импульсных наведенных токов на дефекты в виде трещин заключается в следующем (рис.9.3). Вблизи вершины трещины происходит локальное увеличение плотности тока j , напряженности магнитного поля H и, как следствие, температуры T и электродинамических напряжений $\sigma_{эд}$. Под действием температуры материал вершины трещины оплавляется и дальнейшее её распространение прекращается.

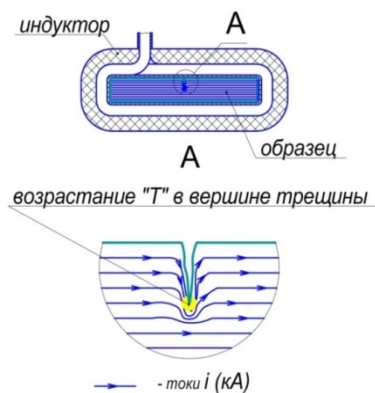


Рис. 9.3 – Возрастание температуры в вершине трещины при воздействии ИМП

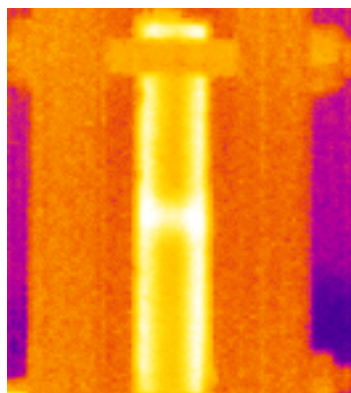


Рис. 9.4 – Картина распределения температурных полей в образце с усталостной трещиной после воздействия ИМП сплава АМг6 ($I=128$ кА)

Такой механизм подтверждается экспериментальными исследованиями распределения температурных полей в образце с усталостной трещиной (рис.9.4).

Испытания на ударную вязкость проводились на маятниковом копре ИО 5003-03 при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 9454-78. В результате этих испытаний было установлено повышение ударной вязкости более чем в 2 раза как для образцов стали 30ХГСА, так и из алюминиевого сплава АМг6.

III. Магнитно-импульсная обработка лежит в основе одного из перспективных физических методов упрочнения режущего инструмента [57,58]. Установлено, что серийное (до 10 импульсов разряда МИУ) воздействие ИМП высокой напряженности (порядка 10^7 А/м) на режущий инструмент (сверла) способствует протеканию необратимых структурных и фазовых изменений в обрабатываемом материале, что приводит к повышению стойкости инструмента в 2-4 раза. Испытания проводились на ОАО «Чебоксарский завод промышленных тракторов» (г. Чебоксары).

10 СПЕЦИАЛЬНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

10.1 Управляемое отделение наноспутников с помощью импульсного магнитного поля

Для исследования околоземного пространства, мониторинга хозяйственной деятельности на земле, проведения космических исследований (экспериментов) все большее применение находят наноспутники класса CubeSat с размерами $100 \times 100 \times 100$ мм и массой 1–3 кг. Осуществляются запуски как одиночных наноспутников, так и выведение на орбиту одновременно или последовательно нескольких наноспутников. Для решения конкретной задачи иногда требуется вывод на орбиты до 50 наноспутников (в пределах одного запуска).

Запуски наноспутников могут осуществляться целевой ракетой-носителем (самостоятельная цель). Существует также способ запуска наноспутника в качестве попутной нагрузки (сопутствующая цель), что экономически более выгодно. При выводе на околоземные орбиты основной полезной нагрузки в конструкции переходного отсека верхней ступени ракеты-носителя имеются свободные объемы, в которых можно разместить попутную нагрузку – наноспутники. При этом необходимо учесть, что ресурс бортового электропитания ракеты-носителя или разгонного блока вырабаты-

вается не полностью, что дает возможность использовать оставшуюся энергию бортового питания для запуска наноспутников.

Для отделения наноспутников от ракеты-носителя используются автономные, индивидуальные устройства – адаптеры (пневматические, механические, пиротехнические). Так, европейский адаптер ISIPOD CubeSat Deployer предусматривает размещение наноспутника в контейнере на пружинной платформе с закрепленной крышкой. Электрический импульс активирует механизм поворота крышки, а пружинный механизм сообщает наноспутнику импульс отделения. Такие устройства имеют довольно сложную конструкцию (наличие удерживающих и поворотных элементов, электроприводы, рычаги, тросы и т.д.) и ограниченную скорость отделения. При применении пиротехнических устройств, после подрыва пиротехнических болтов, отталкивание спутника осуществляется тем же пружинным механизмом.

При отделении наноспутников необходимо обеспечить заданные баллистиками направления и скорость отделения. Эти расчетные параметры закладываются в устройства отделения на земле при выполнении сборочно-монтажных работ и не могут быть при необходимости (из-за погрешности или ошибки вывода последнего отсека на заданную орбиту) скорректированы на момент отделения. Таким образом, существующие устройства отделения не обеспечивают оперативное управление параметрами отделения.

Применяемые устройства отделения наноспутников, кроме того, имеют массу, значительно превышающую массу самого спутника.

Авторами предложено следующее техническое решение [59-62] – использовать для отделения наноспутника импульсное магнитное поле (ИМП). Схема магнитно-импульсного воздействия на наноспутник показана на рис. 10.1.

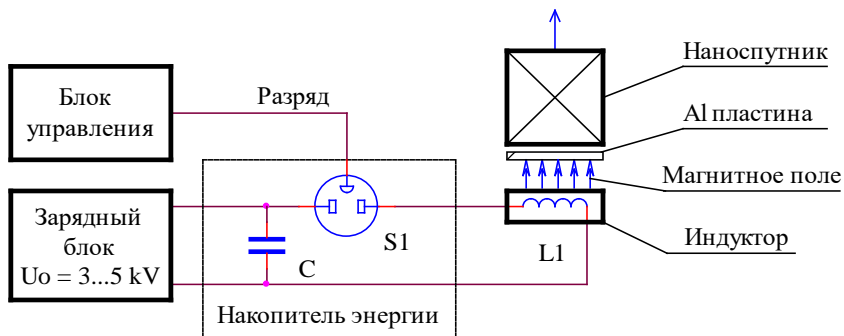


Рис. 10.1 – Функциональная схема магнитно-импульсного воздействия на наноспутник

Уровень запасенной энергии определяет скорость отделения, а угол наклона индуктора с установленным на нем спутником – направление его движения.

Для выведения на орбиту нескольких спутников возможна реализация схем с одновременным или последовательным их отделением [62]. На рис. 10.2 представлена схема последовательного отделения наноспутников при использовании одного общего накопителя энергии в энергоблоке.

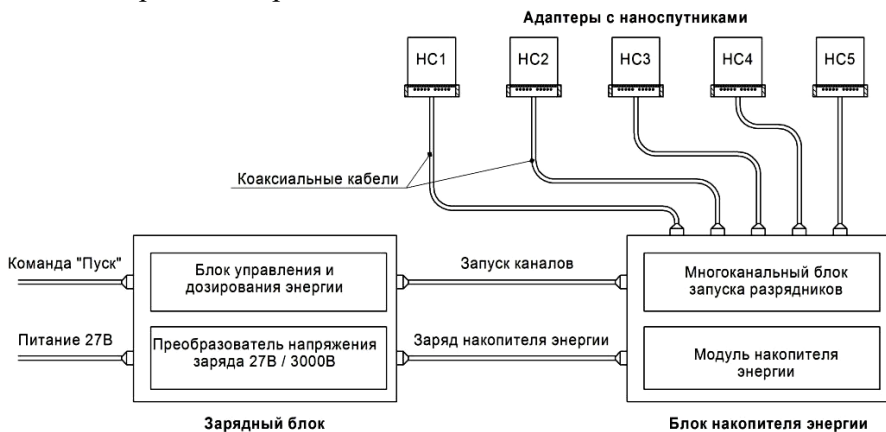


Рис. 10.2 – Структурная схема магнитно-импульсной системы отделения наноспутников с индивидуальными индукторами

На рис. 10.3 показана схема последовательного отделения наноспутников с использованием одного энергоблока и одного индуктора. Подача спутников на рабочее место может быть линейной или роторной.

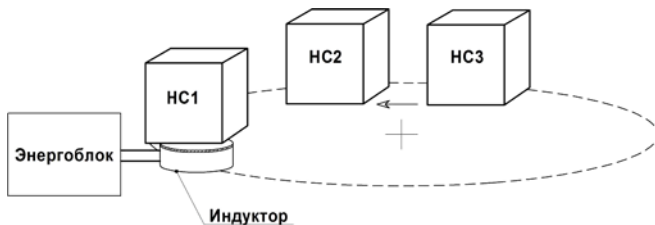


Рис. 10.3 – Схема с роторным позиционированием спутников над индуктором

Разработанные схемные решения обеспечивают как одиночный, так и групповой запуск наноспутников. Благодаря почти полному отсутствию механических систем магнитно-импульсные устройства отделения более простые по конструкции, малогабаритные, имеют незначительную массу. Предлагаемые устройства имеют низкое энергопотребление (до сотни джоулей).

Предложенное техническое решение опробовано в лабораторных условиях. Создан действующий макет системы отделения (рис. 10.4).



Рис. 10.4 – Испытательный стенд с макетом наноспутника

10.2 Установка стержневых элементов на больших глубинах для закрепления датчиков мониторинга морского пространства

Существует проблема закрепления датчиков мониторинга морского пространства на больших глубинах. Причём дрейф датчиков должен быть минимальным.

Установка датчиков позволит определить движущиеся под водой объекты различного назначения, возникновение и распространение естественных возмущений (извержений, цунами и т.п.), осуществить привязку к местности и др.

Существующие методы закрепления датчиков на многокилометровой глубине предусматривают сброс в воду многотонных бетонных блоков с сеткой, к которой и крепятся датчики. Такая технология весьма сложная, не управляемая и не всегда осуществима.

Предлагаемое техническое решение – осуществлять забивку в грунт крепежных элементов, например стержней, на больших глубинах с помощью импульсных магнитных полей [63].

Источник магнитного поля – индуктор, соединен кабелем с магнитно-импульсным генератором, расположенным на надводном корабле. При разряде батареи конденсаторов на индуктор возникают электродинамические силы отталкивания. Стержень, отталкиваясь от индуктора, забивается в грунт. Нагружение может быть многократным. Реактивные силы на индуктор компенсируются (гасятся) толщиной воды с учётом динамики нагружения.

Данный способ был опробован в экспериментальных условиях.

Проверка осуществлялась при выполнении операции забивки стержня в доску толщиной 15 мм (рис. 10.5).

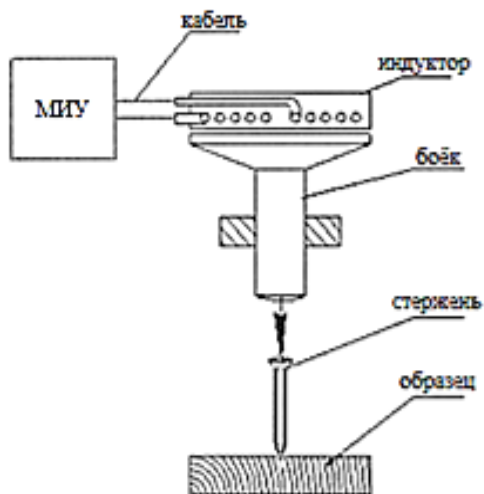


Рис. 10.5 – Схема устройства для установки крепежных элементов

Индуктор \varnothing 100 мм с числом витков $n = 20$ располагался в ударной головке. Толщина водяного столба над ударной головкой $h=250$ мм и $h=500$ мм. Стержень пробивал доску при $W = 0,7$ кДж, при этом «отдача» головки была минимальной: до 2-3 мм.

10.3 Очистка внутренней поверхности нефтепромысловых труб

В процессе эксплуатации проходное сечение нефтепромысловых труб уменьшается из-за отложения на стенках твердых солей. Толщина отложений может достигать 12 мм (рис. 10.6).

Существующие технологии очистки (гидродинамические, механические, химические и др.) не обеспечивают требуемого качества, экологически небезопасны, малопроизводительны, требуют значительного энергопотребления.



а

б

Рис. 10.6 – Очистка труб от твердых солевых отложений:

а – исходное состояние трубы; *б* – труба с отделенными твердыми солями после магнитно-импульсного воздействия

Предложена электрофизическая технология очистки, основанная на высоковольтном разряде в проточной жидкости. Для реализации предложенной технологии создан экспериментальный комплекс, включающий: генератор импульсных токов на основе МИУ-10, разрядную штангу и технологический блок подачи трубы, движения штанги, удаления солей.

Технология внедрена и использована на предприятии «Ставропольнефть» г. Нефтекумск.

При этом достигнуто значительное повышение производительности очистки и её качества.

11 ТИПОВОЙ РЯД МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫХ УСТАНОВОК – ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МИОМ

Оборудованием для реализации магнитно-импульсных технологий являются магнитно-импульсные установки, к которым подключается сменный инструмент – индуктор с технологической оснасткой.

МИУ представляет собой высоковольтный генератор однократных импульсов тока с емкостным накопителем энергии [64].

При разряде накопителя на индуктор за короткое время развиваются высокие мощности в нагрузке МИУ амплитудой 10...1000 МВт в импульсе. Для различных технологических операций МИУ генерирует импульсные токи, величина и длительность которых может изменяться в широких пределах. Рабочий диапазон амплитуды импульсов тока – 5...1000 кА, длительность – 10...1000 мкс.

Интенсивность импульсного давления на материал дозируется с высокой точностью регулированием уровня зарядного напряжения МИУ в широком диапазоне. Изменение длительности и формы импульса, воздействующего на обрабатываемый материал, производится переключением секций накопителя энергии или выбором параметров индуктора.

В МИУ в течение времени 1...10 с происходит накопление энергии при относительно небольшой мощности, потребляемой от сети питания. В зависимости от запаасаемой энергии и производительности среднее потребление электроэнергии МИУ –

0,5...3 кВт/ч по сравнению с традиционным кузнечно-штамповочным оборудованием – 5...20 кВт/ч.

МИУ относятся к классу экологически чистого и энергосберегающего оборудования. Они не имеют механических движущихся частей или гидравлического привода, не создают в процессе работы вибрацию и шум. МИУ не содержат токсичных материалов, не загрязняют окружающую среду опасными выбросами.

Создана гамма МИУ с различными характеристиками [65] по запасаемой энергии, частоте разряда и производительности. По конструктивному оформлению они охватывают широкий диапазон применения, их классификация приведена на рис. 11.1.



Рис. 11.1 – Классификация МИУ

По назначению и запасаемой энергии МИУ можно разделить на три основные группы: малой, средней и большой энергоемкости:

- МИУ малой энергоемкости – 0,5...3 кДж предназначены для обработки малогабаритных заготовок; конструкция мобильная или настольная. МИУ малогабаритной конструкции могут использо-

ваться для ремонтных и сборочных операций на борту летательного аппарата или в полевых условиях, так как они обладают малой массой и не требуют механического, пневматического или гидравлического привода рабочего инструмента;

- МИУ средней энергоемкости – 5...10 кДж универсального назначения; исполнение стационарное или мобильное с возможностью перемещения в пределах участка эксплуатации;

- МИУ большой энергоемкости 20...50 кДж применяют для обработки крупногабаритных заготовок, материалов с низкой электропроводностью, исполнение стационарное.

В зависимости от частоты разрядного тока МИУ используют в различных технологических процессах:

- многопостовые низкочастотные МИУ – 10...40 кГц, используются для формообразующих операций материалов с высокой электропроводностью (медные и алюминиевые сплавы), для обработки крупногабаритных и массивных изделий [66];

- среднечастотные МИУ – 20...50 кГц, универсального назначения, для обработки материалов из сплавов меди, алюминия, стали толщиной 1...5 мм, для операций формовки, сборки, резки, калибровки и т.д.;

- высокочастотные МИУ – свыше 100 кГц, для обработки тонкостенных заготовок, металлов с низкой электропроводностью и специальных видов обработки, например, импульсной сварки.

Накопитель энергии высокочастотной МИУ должен иметь минимальную собственную индуктивность и емкость. Уменьшение емкости приводит к увеличению напряжения заряда, что ограничено электрической прочностью изоляции индуктора на уровне 20...25 кВ. Для уменьшения индуктивности разрядного контура созданы МИУ с многоконтурной схемой и параллельным включе-

нием отдельных модулей. На рис. 11.2 приведена функциональная схема высокочастотной многоконтурной МИУ.

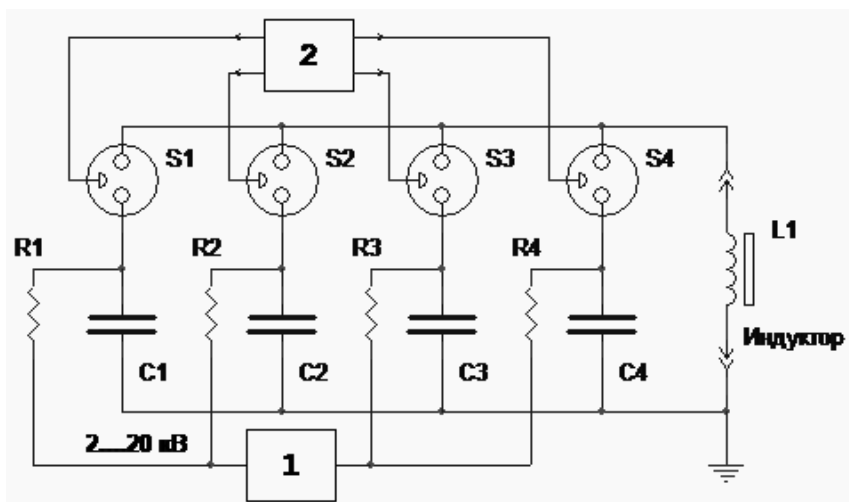


Рис. 11.2 – Структурная схема многоконтурной высокочастотной МИУ

Параллельное включение четырех модулей к общей нагрузке позволяет снизить собственную индуктивность пропорционально количеству модулей и повысить частоту разрядного тока. При этом снижаются плотности тока и электрические потери в элементах накопителя энергии, что способствует повышению общего ресурса работы МИУ. Алгоритм работы схемы должен обеспечивать автоматический заряд всех модулей до заданного уровня энергии от общего источника питания 1 и синхронный разряд блоком запуска 2 на общую нагрузку – индуктор L1.

МИУ с большой запасаемой энергией 20...100 кДж выполняются также из нескольких разрядных контуров – модулей накопителя энергии. Энергия каждого модуля не превышает 10...15 кДж. При использовании многоконтурных накопителей в МИУ с большой запасаемой энергией решаются две проблемы: первая – огра-

ничение плотности тока в элементах накопителя энергии, что повышает ресурс работы и уменьшает риски аварийного разрушения МИУ при пробое изоляции. Вторая задача – снижение общей индуктивности МИУ при параллельном соединении нескольких одинаковых разрядных контуров.

В разработках МИУ нового поколения включены высокотехнологичные отечественные компоненты и новые схемные решения, позволяющие увеличить ресурс работы и отвечающие современным требованиям экологической безопасности.

Для снижения собственной индуктивности МИУ накопитель энергии содержит пленочные импульсные конденсаторы высокой удельной энергии серии КПИМ с собственной индуктивностью не более 10...20 нГн. В разработках МИУ нового поколения используются отечественные пленочные конденсаторы. Конденсаторы КПИМ имеют индуктивность, габариты и массу в 3...5 раз меньше по сравнению с традиционными бумажно-масляными конденсаторами. Применение пленочных конденсаторов уменьшает себестоимость накопителя энергии на 20...40%. По ряду параметров отечественные конденсаторы КПИМ превосходят показатели наиболее авторитетных зарубежных производителей «General Atomics», «RTE Aerovox» (США), «ICAR Spa» (Италия).

В качестве коммутаторов тока используются экологически чистые вакуумные разрядники серии РВУ или газовые тиратроны серии ТДИ. Разрядники представляют собой функционально законченные приборы компактной конструкции с минимальной индуктивностью. Основное достоинство таких разрядников: высокий ресурс работы, широкий диапазон рабочих напряжений, малые габариты и масса, высокое быстродействие. В процессе эксплуатации

они не требуют специального обслуживания и регулировки при изменении рабочих режимов.

В конструкции МИУ применены вакуумные и газовые разрядники отечественной разработки, превосходящие по своим параметрам зарубежные аналоги.

Для обработки крупногабаритных пространственных и длинномерных заготовок применяются многосекционные индукторы [67], в которых отдельные секции индуктора коммутируются поочередно. В этом случае наибольшую эффективность обеспечивают многопостовые установки. Функциональная схема многопостовой установки приведена на рис. 11.3.

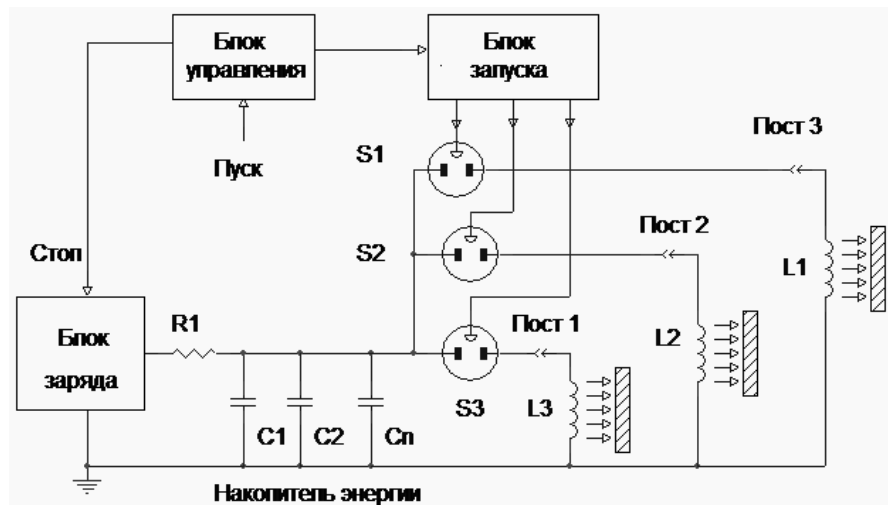


Рис. 11.3 – Функциональная схема трехпостовой установки

На рис. 11.4 показан пример технологической схемы формовки-калибровки крупногабаритных пространственных оболочек. Крупногабаритные заготовки обрабатываются отдельными элементами для снижения запасаемой энергии, необходимой для выполнения технологической операции.

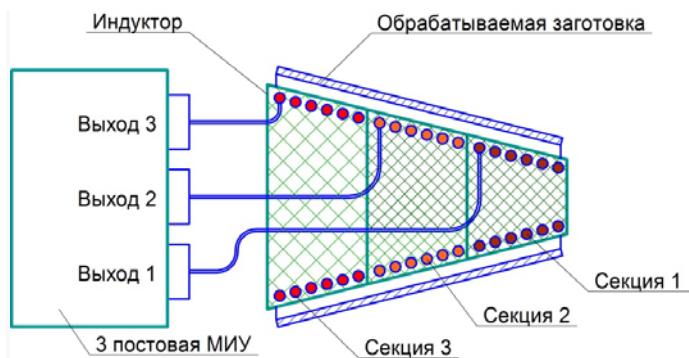


Рис. 11.4 – Технологическая схема обработки крупногабаритной заготовки

Так образом, конструкции МИУ нового поколения полностью выполнены на отечественных импортозамещающих компонентах, что позволило довести стоимость оборудования \$1500...2000 за 1 кДж по сравнению со стоимостью импортных образцов \$4000 за 1 кДж. Созданные конструкции МИУ имеют параметры, превосходящие зарубежные аналоги (табл. 11.1).

Таблица 11.1 – Сравнительные параметры МИУ с запасаемой энергией 10 кДж и зарубежных

Тип МИУ	W_0 , кДж	F_0 , кГц	Масса, кг	Габаритные размеры, м	Производитель
МИУ-10ВЧ	10	100	400	0,8×0,6×1,5	Самарский университет (Россия)
МИУ-А-10	10	52	1600	1,4×1,3×1,7	ХПИ (Украина)
model 7120	12	45	1200	1,1×1,2×0,9	«Maxwell» (USA)

Установки с запасаемой энергией до 10 кДж выполнены в моноблочном корпусе, в котором размещаются: накопитель энергии, зарядное устройство, система управления и элементы монтажа технологической оснастки с рабочим индуктором. Такие установки мобильные и могут перемещаться в пределах производственного участка.

Таким образом, созданы универсальные и специальные установки малой, средней и высокой энергоемкости, низко- и высокочастотные, многоблочные и многостовые, мобильные и стационарные, в горизонтальном и вертикальном исполнении, использующие отечественные комплектующие и современную элементную базу, новые схемные решения, что и обеспечило параметры МИУ, превышающие зарубежные аналоги и отвечающие требованиям отечественной промышленности.

Примеры некоторых типов МИУ даны на рис. 11.5-11.10.

На рис. 11.5 показаны варианты конструкции мобильной МИУ с креплением узла технологического индуктора и оснастки на выходных выводах, расположенных на вертикальной или горизонтальной панелях энергоблока.

Конструкции МИУ с энергией выше 20 кДж (рис. 11.6 – 11.9) стационарные. Такие установки имеют дистанционный пульт управления, который может быть вынесен за пределы рабочей зоны для защиты персонала от электромагнитного излучения.

Технологическая оснастка с индуктором может подключаться через переходный кабель, например для дистанционной работы с крупногабаритным индуктором или на стапеле с обрабатываемым материалом.

Конструкции МИУ с энергией выше 20 кДж – стационарные. Такие установки имеют дистанционный пульт управления, который может быть вынесен за пределы рабочей зоны для защиты персонала от электромагнитного излучения.



Рис. 11.5 – Варианты конструкций МИУ с энергией 10 кДж



Рис. 11.6 – Установка универсального назначения с энергией 20 кДж



Рис. 11.7 – Установка универсального назначения с энергией 30 кДж



Рис. 11.8 – 6-постовая специализированная МИУ-30



Рисунок 11.9 – Конструкции установок большой энергоемкости 50 кДж



a



б



в

Рис. 11.10 – Конструкции малогабаритных МИУ специального назначения:
a – МИУ-У ($W=3,5$ кДж, $F_{\max}=200$ кГц); *б* – МИУ-0,5 ($W=0,5$ кДж, $F_{\max}=100$ кГц); *в* – 3-постовая установка специализированная ($W=3$ кДж)

На рис. 11.8 показана конструкция шестипостовой МИУ с запасаемой энергией 30 кДж для обработки крупногабаритных оболочек – обтекателей самолета и камер сгорания двигателя в отраслях авиационного и космического машиностроения. Секции индуктора подключаются к рабочим постам МИУ переходным кабелем, состоящим из системы параллельных высоковольтных коаксиальных кабелей. Кабельное соединение МИУ с индуктором позволяет работать с крупногабаритным обрабатываемым изделием, расположенным на стапеле на расстоянии до 5 метров.

На рис. 11.10 показаны конструкции малогабаритных МИУ специального назначения: для сборки корпусов кабельных разъемов – МИУ-0,5 и обработки сверхтонкостенных заготовок приборного производства – МИУ-У.

На рис. 11.10, в показана конструкция трехпостовой МИУ настольного исполнения для обработки малогабаритных тонкостенных изделий толщиной 0,15...0,5 мм. Установка предназначена для выполнения трех видов технологических операций за один цикл работы (формовка, сварка, чеканка резьбы, калибровка и др.) в разных сочетаниях или трехкратного выполнения однотипной операции. Обработка заготовок ведется последовательно на трёх постах по программе, заранее заданной системой управления: в моно- и многоимпульсном режимах (до трёх импульсов разряда на каждом посту) с индивидуальной задачей энергии на каждый импульс.

Пример внутреннего содержания и монтажа МИУ приведен на рис. 11.11.



a

б

Рис. 11.11 – Конструкция накопителей энергии МИУ:
a – энергоблок высокочастотной МИУ-10 (10кДж, 100кГц);
б – энергоблок универсальной МИУ-30 (30 кДж, 50 кГц)

Преимущества разработанных конструкций МИУ нового поколения:

- накопители энергии содержат импульсные конденсаторы высокой удельной энергии 0,1...0,3 кДж/кг с малым содержанием масляного диэлектрика, снижающим риск экологической и пожарной опасности;
- используются экологически чистые разрядники с высоким ресурсом работы, не требующие настройки и периодического обслуживания;
- заряд накопителя энергии производится в режиме «мягкого пуска», отвечающего современным требованиям энергосбережения;
- габариты и масса МИУ снижены по сравнению с функциональными аналогами прошлых лет в 2...3 раза.

Параметры установок нового поколения охватывают широкий диапазон технологических применений.

В течение 2000...2019 гг. специалистами Самарского университета разработано и внедрено на различных предприятиях в промышленности и научно-исследовательских организациях в России и за рубежом более 40 единиц магнитно-импульсных установок нового поколения с комплектом технологического оснащения.

Таким образом, для промышленной реализации магнитно-импульсных технологий создана широкая номенклатура оборудования универсального и специального назначения с параметрами, превышающими технико-экономические показатели зарубежных аналогов.

В табл. 11.2 приведен список созданных и поставленных заказчикам МИУ и их основные характеристики.

Таблица 11.2 – Список созданных и поставленных заказчикам МИУ

Тип МИУ	Запасаемая энергия	Год разработки	Заказчик
1	2	3	4
Установки большой емкости			
МИУ-50-20	50 кДж	2000	Китай, г. Пекин
МИУ-50М		2001	Россия, г. Самара
МИУ-50/25		2004	Китай, г. Пекин
МИУ-50М2		2005	Россия, г. Самара
МИУ-50У		2009	Швейцария, г. Ла-Шо-де-Фон

Продолжение табл 11.2

1	2	3	4
МИУ-30М	30 кДж	2006	Россия, г. Самара
МИУ-30К		2010	Россия, г. Москва
МИУ-30/10		2014	Россия, г. Самара
МИУ-30Н		2016	Россия, г. Новосибирск
МИУ-30Т2		2018	Россия, г. Тула
Установки универсального назначения			
МИУ-20КЭ	20 кДж	2014	Россия, г. Москва
МИУ-20ВЧ	20 кДж	2017	Россия, г. Самара
МИУ-15	15 кДж	2006	Россия, г. Самара
МИУ-15		2015	Россия, г. Санкт-Петербург
МИУ-10М	10 кДж	2002	Финляндия, г. Лаппеэнранта
МИУ-10У		2004	Россия, г. Самара
ГИТ-7Э		2010	Россия, г. Электросталь, МО
МИУ-10Л		2010	Россия, г. Самара
МИУ-10ВЧ		2012	Россия, г. Самара
МИУ-10Д		2013	Россия, г. Самара
МИУ-10Е		2013	Швейцария, г. Ла-Шо-де-Фон
ГИТ-10М		2014	Россия, г. Самара
ГИТ-5-30		2003	Россия, г. Нефтекумск
МРІ-10D		2015	США, г. Питтсбург
МИУ-10Н		2016	Россия, г. Новосибирск
МИУ-10/20		2017	Китай, г. Пекин

Окончание табл 11.2

1	2	3	4
МИУ-5ТМ	5 кДж	2014	Россия, г. Москва
МИУ-3	3 кДж	2006	Россия, г. Самара
МИУ-3У		2009	Швейцария, г. Ла-Шо-де-Фон
МИУ-У		2010	Россия, г. Москва
Малогабаритные и специального назначения			
МИУ-1С	1 кДж	2005	Россия, г. Самара
МИС-1300	1,3 кДж	2009	Россия, г. Москва
ГИТ-НС	1,2 кДж	2015	Россия, г. Самара
МИУ-500	0,5 кДж	2011	Россия, г. Кострома
МИУ-300	0,3 кДж	2009- 2012	Россия, г. Москва, (изготовлено 5 единиц)
МИК-3П	0,5 кДж	2012	Россия, г. Москва

При создании МИУ использованы отечественные компоненты, превосходящие по ряду параметров зарубежные импортные комплектующие – по ресурсу работы, экологическим показателям, массогабаритным характеристикам.

Стоимость созданного оборудования в 1,5...2 раза дешевле зарубежных образцов по сравнимым параметрам.

12 ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Технологические процессы МИОМ носят сложный электромеханический характер.

Электродинамические силы имеют объемное распределение по заготовке. Импульсное нагружение генерирует в заготовке волны напряжения, которые определяют ее деформирование. Перемещение заготовки изменяет характеристики зазора между индуктором и заготовкой, а следовательно изменяет параметры разрядной цепи и электродинамических сил. При соударении с матрицей заготовка нагружается импульсными контактными силами, генерирующими в ней упругие и пластические волны напряжений. Размеры готовой детали и распределение в ней остаточных напряжений определяются совместным действием электродинамических сил, деформацией заготовки во время разгона и соударения с матрицей [3].

Таким образом, на результат процесса действует множество взаимно связанных факторов. Поэтому аналитические расчеты и численное моделирование процессов МИОМ обычно проводят на упрощенных моделях при допущениях, касающихся параметров разрядной цепи МИУ и магнитного поля в изоляционном зазоре, в материале индуктора и заготовки, а также физических и механических свойств материалов индуктора и заготовки.

Наиболее точные результаты дает компьютерное моделирование процессов, так как оно использует наименьшее количество упрощающих допущений. Компьютерное моделирование процессов МИОМ основано на использовании методов конечных разностей и конечных элементов. В аналитических и численных методах широко используется аппарат вариационного исчисления.

До практической реализации доведена инженерная методика расчета процессов МИОМ [3, 68-70].

В основе большей части инженерных методик лежит расчет по аналитическим формулам, поэтому время расчета процесса на персональном компьютере не превышает нескольких секунд. Инженерные методики могут использоваться для разработки промышленной технологии с последующей экспериментальной отработкой процесса.

Энергия, необходимая для выполнения операции, рассчитывается по формуле:

$$W = \frac{P_m \Omega \delta_e}{K_1 K_2 K_3 K_4}, \quad (12.1)$$

где P_m – амплитудное значение давления импульсного магнитного поля; Ω – площадь рабочей поверхности индуктора.

Коэффициент K_1 характеризует эффективность передачи энергии, накопленной в батарее конденсаторов МИУ, в рабочую зону индуктора. Его значение определяется выражением:

$$K_1 = \frac{L_c}{L_c + L_{dc}} = \frac{f_{dc}^2 - f_w^2}{f_{dc}^2}, \quad (12.2)$$

где L_{dc} и f_{dc} – индуктивность и частота разрядного тока МИУ в режиме короткого замыкания; f_w – рабочая частота разрядного тока.

Коэффициент K_2 , учитывающий активные потери в индукторе и заготовке, рассчитывается по выражению:

$$K_2 = \exp\left(-\frac{1}{Q} \operatorname{arctg} 2Q\right), \quad (12.3)$$

где Q – добротность разрядного контура.

Коэффициенты K_3 и K_4 учитывают влияние неоднородности магнитного поля в объеме $\Omega \cdot \delta_e$ и просачивания магнитного поля сквозь материал заготовки соответственно. Значения коэффициентов K_3 и K_4 определяются выражениями:

$$K_3 = \frac{\partial L_c}{\partial \delta_e} \cdot \frac{\delta_e}{L_c}, \quad (12.4)$$

$$K_4 = \frac{Q_p^2}{Q_p^2 + \frac{L_{dc}}{L_c}}, \quad (12.5)$$

где Q_p – добротность заготовки.

Кроме того, для ряда технологических задач, где используются индукторы с неперекрытыми витками, описанная методика дополнена новыми аналитическими выражениями, учитывающими эти особенности.

Для учета влияния витков индуктора, не покрытых заготовкой, вместо величины эквивалентного зазора между индуктором и заготовкой δ_e следует подставить значение приведенного зазора δ_k , которое рассчитывается по формуле:

$$\delta_k = \frac{\delta \cdot N_w + \sum_1^{N_f-1} \sqrt{(s_c \cdot N_f + \delta_c)^2 + \delta^2}}{N}, \quad (12.6)$$

где N_w и N_f – количество рабочих и свободных витков индуктора соответственно; $N = N_w + N_f$ – общее количество витков индуктора; s_c – шаг витков индуктора; δ_c – толщина межвитковой изоляции индуктора.

Для того, чтобы учесть изменение зазора между индуктором и заготовкой в процессе разгона деформируемой зоны заготовки, необходимо ввести в формулу (12.5) половину величины перемещения заготовки на активном участке разгона h .

Тогда выражение для расчета необходимой энергии разряда МИУ для выполнения технологических операций получит следующий вид:

$$W_w = \frac{P_m \Omega (\delta_k + 0,5h)}{K_1 K_2 K_3 K_4} (k + 1)^2, \quad (12.7)$$

Таким образом, разработанная инженерная методика расчета параметров процессов МИОМ в полной мере учитывает специфику процессов и может применяться для расчета режимов операций формовки, сборки и калибровки как листовых, так и трубчатых заготовок.

Расчет процессов МИОМ с применением разработанной инженерной методики включает несколько этапов: расчет механических характеристик процесса выбора МИУ, расчет параметров индукторной системы и расчет режимов процессов МИОМ.

На основании разработанной инженерной методики расчета была создана кроссплатформенная автоматизированная информационная система с применением объектно-ориентированного языка программирования Java SE 8 в среде IntelliJ IDEA 15.0.3, способная работать под управлением операционных систем Linux, Windows, Mac OS X и Solaris. В качестве системы управления базой данных была выбрана H2Database Engine [71].

Данная система имеет режим Администратора, который позволяет расширять созданную базу материалов, МИУ и типоразмеров шин для намотки токопровода индуктора, а также добавлять различные макросы и подпрограммы для расчета технологических операций.

Кроме того, результатами расчетов в данной системе являются не только параметры процессов, а также рабочий чертеж соответствующей индукторной системы и расчетный файл для программного комплекса LS-DYNA, содержащий все необходимые начальные условия.

В последние годы численное моделирование процессов МИОМ чаще всего осуществляется с помощью многоцелевого конечно-элементного комплекса LS-DYNA. Это связано с тем, что данный комплекс позволяет проводить анализ нелинейных быстропротекающих процессов в задачах механики твердого тела и деформирования металлов [72]. Также в состав комплекса входит электромагнитный модуль [73], который позволяет решать связанные задачи с учетом явлений электромагнетизма, тепла и механики. Следовательно, данный электромагнитный модуль наилучшим образом подходит для моделирования процессов МИОМ.

Ниже, в качестве примера, представлены некоторые результаты компьютерного моделирования различных технологических процессов МИОМ с применением разработанной автоматизированной информационной системы.

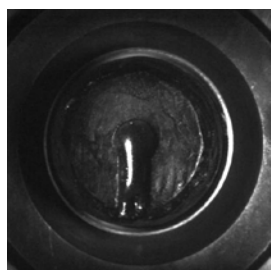
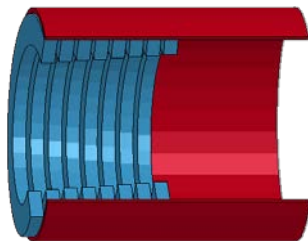
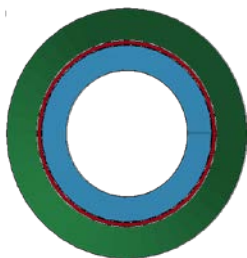
Так, на рис. 12.1 показано сравнение процесса формовки конуса, снятого во время эксперимента на цифровую высокоскоростную камеру Cordin 505, с результатами компьютерного моделирования в характерные моменты времени.

На рис. 12.2 приведен фрагмент компьютерного моделирования процесса магнитно-импульсной формовки рифта из плоской заготовки.

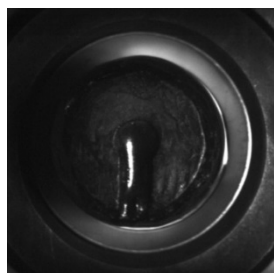
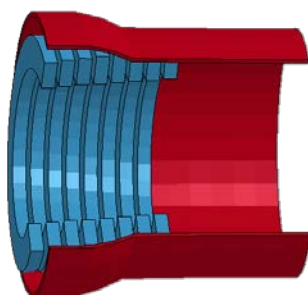
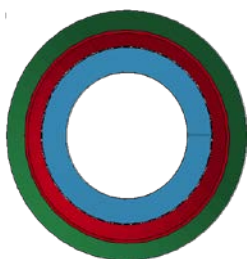
На рис. 12.3 приведена качественная и количественная оценка разрядного тока в токопроводе индуктора и индуцированного тока в трубчатой заготовке в характерный момент времени для процесса магнитно-импульсной сборки.



0 мкс



37,5 мкс



60 мкс

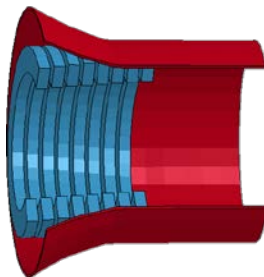
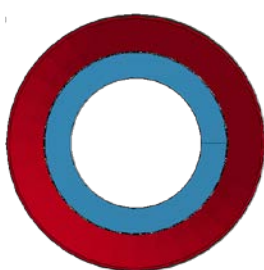


Рис. 12.1 – Сравнение результатов эксперимента с результатами компьютерного моделирования процесса магнитно-импульсной формовки конуса

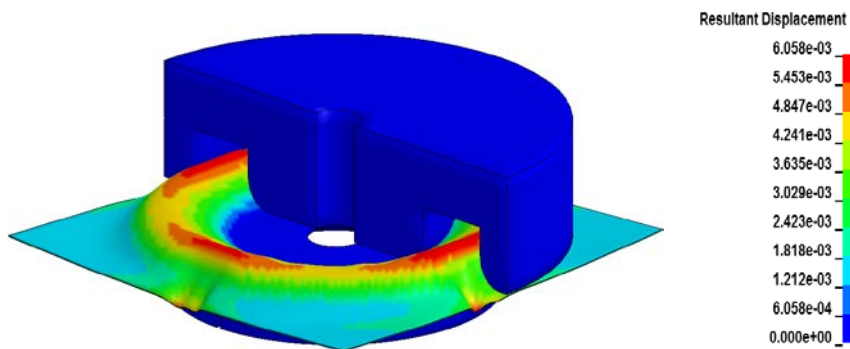


Рис. 12.2 – Фрагмент процесса формовки рифта на плоской заготовке

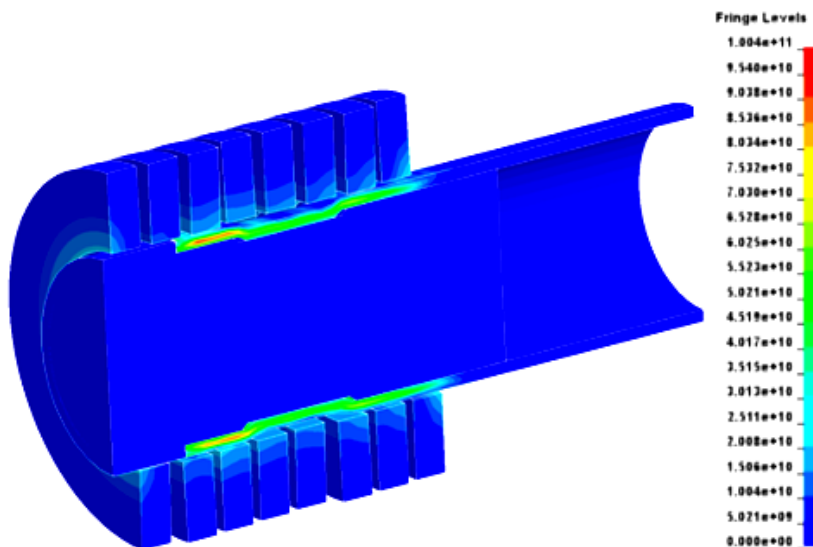


Рис. 12.3 – Оценка плотности тока в системе «индуктор-заготовка»

На рис. 12.4 приведены результаты моделирования и экспериментальной отработки комбинированной технологии вытяжки с магнитно-импульсной формовкой продольных рифтов. Видно, что оценка формуемости заготовки, полученная с помощью моделирования, полностью совпадает с результатами экспериментов.

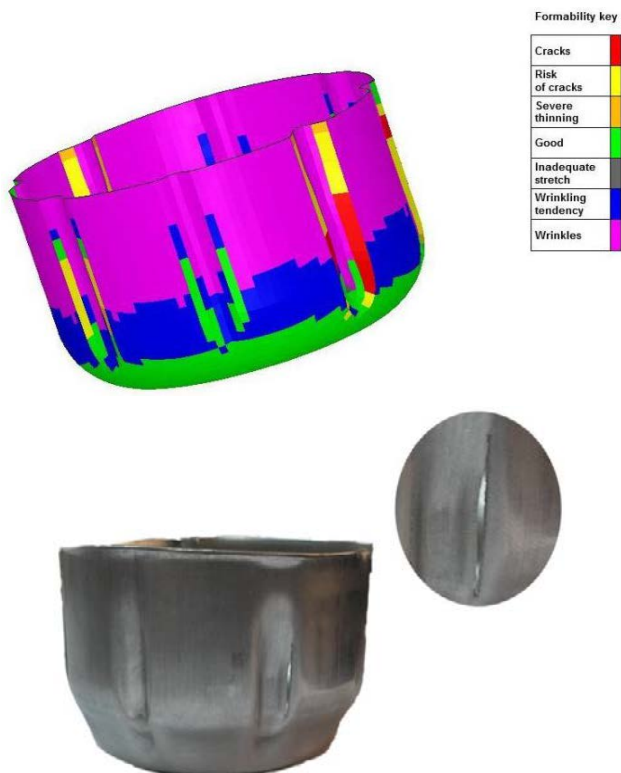


Рис. 12.4 – Процесс формовки продольных рифтов

Таким образом, созданная инженерная методика проектирования процессов МИОМ совместно с разработанной методикой компьютерного моделирования является мощным инструментом для совершенствования существующих и разработки новых магнитно-импульсных технологий.

13 ИНДУКТОРЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

В процессах МИОМ основными инструментами являются индуктор и матрица или оправка в зависимости от основной схемы деформирования заготовки [3].

Преобразование электрической энергии, накопленной батареей конденсаторов МИУ, в кинетическую энергию движения метаемой заготовки или механическую работу деформирования заготовки производится с помощью инструмента – индуктора при протекании по нему разрядного тока. Создана гамма индукторных систем, определяемая формой деталей, типом производства, специальными требованиями и другими особенностями их эксплуатации.

По форме индукторы делятся на 3 вида (рис. 13.1), соответствующих трем схемам магнитно-импульсной обработки: *а* – для раздачи, *б* – обжима трубчатых заготовок, *в* – деформирования плоских заготовок.



а



б



в

Рис. 13.1 – Виды индукторов по форме

Созданы одно- и многовитковые индукторы. Многовитковые индукторы более эффективно преобразуют электрическую энергию, накопленную в батарее конденсаторов, в механическую, но стойкость их ниже, чем одновитковых.

Для увеличения прочности индуктора предложено изготавливать спираль биметаллической или использовать наноструктурированный материал «медь-ниобий», а для снижения тепловой нагрузки на индуктор спираль изготавливают полый и пропускают по каналу охлаждающую жидкость, как это показано на рис. 13.2.



Рис. 13.2 – Охлаждаемый многовитковый индуктор

Для использования одновитковых индукторов созданы согласующие устройства, позволяющие с малыми потерями передать энергию, накопленную в батарее конденсаторов, в рабочую зону одновиткового индуктора. Одной из разновидностей одновитковой индукторной системы с согласующим устройством является индуктор с концентратором магнитного поля (рис.13.3). Концентратор представляет собой массивный виток, который имеет радиальный разрез. Концентратор индуктивно связан с обмоткой.



Рис. 13.3 – Разъемный концентратор для сборки кабелей с наконечниками

Для согласования параметров установки и одновиткового индуктора разработаны импульсные трансформаторы [67] кабельного (рис.13.4, *а*) или обмоточного (рис. 13.4, *б*) типов.



а

б

Рис. 13.4 – Трансформаторы кабельного *а* и обмоточного *б* типов

При обработке деталей небольших размеров целесообразно использовать многопозиционные индукторы [68]. На рис. 13.5 представлены разъемные многопозиционные индукторы цилиндрического *а* и линейного *б* типов.



a



б

Рис. 13.5 – Многопозиционные разъемные индукторы цилиндрического *a* и линейного *б* типов

Штамповая оснастка, используемая при магнитно-импульсной обработке, отличается простотой конструкции и малой металлоемкостью. Это обусловлено тем, что в ее состав входит один элемент, определяющий форму и размеры штампуемого изделия, то есть матрица, оправка или формблок в зависимости от вида выполняемой операции. Роль пуансона и среды, передающей усилие, деформирующее заготовку, выполняет импульсное магнитное поле, создаваемое индуктором.

При проектировании инструмента необходимо иметь в виду такие особенности магнитно-импульсной обработки, как динамический характер нагружения заготовки и наличие мощного переменного магнитного поля.

Пластическая деформация матриц и оправок при магнитно-импульсной обработке может являться следствием волновых эффектов, возникающих в результате высокоскоростного соударения заготовки с рабочей поверхностью матрицы или оправки. Значение предельной скорости соударения V_{Lm} , вызывающей переход материала матрицы в пластическое состояние, определяется выражением:

$$V_{Lm} = \frac{\sigma_{ym}}{(\rho C)_m} \cdot \frac{1 - \nu_m}{1 - 2\nu_m} \left(1 + \frac{(\rho C)_m}{(\rho C)_p} \right). \quad (13.1)$$

Здесь индекс m относится к материалу матрицы, а индекс p – к материалу заготовки.

Внешний вид матриц и оправок приведен на рис. 13.6.

В условиях мелкосерийного производства при выполнении операций, не сопровождающихся высокой скоростью соударения заготовки с инструментом, матрицы и оправки могут изготавливаться из неметаллов.



Рис. 13.6 – Инструмент для магнитно-импульсной формовки

Для выполнения операций по изготовлению крупногабаритных деталей использованы специализированные приспособления. Это связано с тем, что большие габариты изготавливаемых деталей требуют применения достаточно сложной универсальной оснастки, обладающей высокой жесткостью. Поэтому металлоемкость универсальной оснастки значительно выше, чем специализированных приспособлений.

Вспомогательная технологическая оснастка обеспечила: установку инструмента (индукторов и матриц или оправок) и заготовок на рабочей позиции магнитно-импульсной установки (МИУ), позиционирование индуктора относительно матриц или оправок и токовыводов МИУ, создание усилия смыкания заготовки и инструмента для восприятия реактивных усилий, возникающих при выполнении операций.

На рис. 13.7 в качестве примера показан универсальный пресс для выполнения операций листовой штамповки, имеющий пневматический привод.



Рис. 13.7 – Пневматический пресс для штамповки плоских деталей

Использование вспомогательной оснастки снижает затраты на оснастку и улучшает условия труда.

14 ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ УЧАСТКИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ РЕАЛИЗАЦИИ

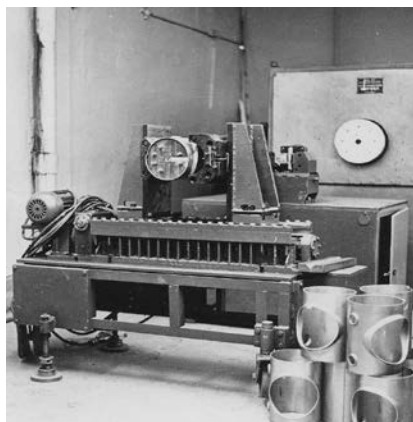
Магнитно-импульсная обработка нашла широкое практическое использование во многих отраслях промышленности. Особенно широко она распространилась в машиностроительных и электротехнических отраслях промышленности. Участки магнитно-импульсной обработки прочно вошли в стержневой технологический комплекс многих предприятий.

На рис. 14.1 представлен ряд участков МИОМ, успешно работающих на предприятиях России и за рубежом.

На заводе имени Хруничева в г. Москве создан участок по изготовлению кабельных разъемов нового типа, представленный на рис. 14.2.

Всего на предприятиях России в настоящее время действуют 17 участков магнитно-импульсной обработки в городах: Самара, Москва, Королёв (МО), Дзержинск, Электросталь (МО), Тула, Новосибирск, Смоленск, Санкт-Петербург, Ухта, Кострома, Нефтекумск.

Участки МИОМ, функционирующие за рубежом в городах: Пекин (КНР), Питтсбург (США), Лаппеэнранта (Финляндия), Ла-Шо-де-Фон (Швейцария).



а



б



в

Рис. 14.1 – Участки магнитно-импульсной технологии:
а – участок МИОМ в заготовительно-штамповочном цехе
 АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара; *б* – участок сборки электрожгутов
 в сборочном цехе «НАЗ им. В.П. Чкалова», г. Новосибирск;
в – участок листовой штамповки на заводе «Столица», г. Пекин



Рис. 14.2 – Участок изготовления кабельных разъемов на ФГУП «ГКНПЦ им.М.В. Хруничева», г. Москва

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан, исследован и внедрен в производство целый комплекс инновационных магнитно-импульсных технологий в машиностроении и металлургии: штамповки (резка, формовка, калибровка), сварки, сборки, упрочнения, обеспечивающий не только технологический прорыв, но и давший возможность создания и реализации новых конструктивных решений при создании конкурентной продукции.

2. Открыты новые научно-технические направления: разработка гибридных и комбинированных технологий, сочетающих статическое и магнитно-импульсное нагружения; технологий, основанных на воздействии импульсных магнитных полей на расплав; физическое и технологическое использование ИМП в спецусловиях (космосе, на больших морских глубинах); экологическое – утилизация волокнистых композиционных материалов (порошковая металлургия).

3. Разработаны методики расчёта, проектирования, компьютерного моделирования, экспериментальных исследований магнитно-импульсных процессов, создан Центр коллективного пользования.

4. Новизна разработок подтверждена сорока двумя выданными на имя университета патентами РФ.

5. Для реализации новых разработок разработана гамма универсального и специального многофункционального оборудования – МИУ – с параметрами, превышающими параметры зарубежных аналогов, создан необходимый инструмент – индукторы и оснастка.

6. Благодаря полученным авторским коллективом результатам магнитно-импульсные технологии стали востребованы на предприятиях авиакосмической, электротехнической, электронной, автомобильной, атомной, судостроительной, нефтедобывающей промышленности.

7. На предприятиях России созданы «под ключ» и успешно функционируют 17 производственных участков магнитно-импульсной обработки.

8. Разработки в области МИОМ стали экспортными, востребованными фирмами в таких странах как США, Финляндия, Швейцария, Китай, Германия и Италия, где работают 7 созданных производственных участков.

9. Эффективность разработок – в повышении качества готовой продукции, её надежности и ресурса при её эксплуатации, сокращении протяженности сварных швов, почти полной ликвидации брака; позволяет упростить конструкции изделий, снизить их вес и габаритные размеры, повысить механические и эксплуатационные характеристики металла, значительно сократить трудоемкость изготовления продукции при одновременном упрощении конструкции и снижении металлоемкости технологической оснастки.

10. Для расширения областей использования новых технологий авторы довели результаты своих разработок до научных и инженерно-технических работников через написанные и изданные 3 монографии, учебник, 7 учебных пособий, 72 статьи, 39 докладов на научно-технических конференциях, через демонстрацию экспонатов на отечественных и международных выставках, высоко оцененных международным жюри (15 золотых и 5 серебряных медалей и дипломов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Electromagnetic forming / V. Psyka, D. Rischa, B.L. Kinseyb, A.E. Tekkayaa, M. Kleinera // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211. – P. 787-829.

2. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков: Вища школа, 1977. – 168 с.

3. Глущенко В.А., Карпухин В.Ф. Технология магнитно-импульсной обработки материалов: монография. – Самара: Изд. дом «Федоров», 2014. – 208 с.

4. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий.– Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ», 2001. – Т. 1. – 272 с.

5. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 392 с.

6. Глущенко В.А. Магнитно-импульсная обработка металлов. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1984. – №7. – С. 2-3.

7. Степанов В.Г., Шавров Н.А. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов. – Л.: Машиностроение, 1975. – 280 с.

8. Высокоэффективные технологические процессы изготовления трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов/ В.А. Барвинок, А.Н. Кирилин, А.Д. Комаров [и др.]; под общ. ред. чл.-кор. РАН В.А. Барвинка. – М.: Наука и технология. – 2002. – 394 с.

9. Глущенко В.А. Применение импульсных магнитных полей в технологии листовой штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – № 8. – С. 18-21.

10. Глущенко В.А., Стукалов С.А. Особенности магнитно-импульсной штамповки тонкостенных трубчатых деталей сложной формы // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – № 12. – С. 2–4.

11. О некоторых особенностях формообразования крупногабаритных тонкостенных ожевальных оболочек импульсным магнитным полем / Ю.П. Курьянов, Ю.М. Овчинников, Д.Н. Лысенко, В.А. Глущенко // Вопросы технологии производства летательных аппаратов: межвуз. сб. – Куйбышев, 1978. – Вып. 1. – С. 21-25.

12. Глущенко В.А, Курьянов Ю.П. Магнитно-импульсная обработка материалов. Штамповка ожевальных оболочек: монография. – Самара: Изд. дом «Федоров», 2015. – 133 с.

13. Сильные и сверхсильные магнитные поля и их применение / под ред. Ф. Херлаха. – М.: Мир, 1988. – 456 с.

14. Отбортовка отверстий и наружного контура заготовок из листового металла импульсным магнитным полем / Г.М. Лебедев, А.Д. Комаров, Г.З. Исарович, Д.Н. Лысенко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – №4. – С. 25-28.

15. Глущенко В.А. Магнитно-импульсные технологии изготовления из полых заготовок деталей и узлов летательных аппаратов и двигателей. // Материалы Второй Международной научно-технической конференции «МЕТАЛЛДЕФОРМ-2004». – Самара, 2004. – С. 32-40.

16. Бурмистров А.Е., Глущенко В.А. Качество деталей, получаемых магнитно-импульсной резкой. // Магнитно-импульсная обработка материалов на современном этапе: труды Первой Международ. науч.-техн. конф. «МЕТАЛЛДЕФОРМ-99». Секция 4. – Самара, 1999. – С. 14-19.

17. Групповая пробивка отверстий с использованием энергии импульсного магнитного поля / Г.М. Лебедев, А.А. Макаров, А.Д. Комаров, Д.Н. Лысенко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1968. – № 4. – С. 20-21.

18. Коневцев И.Б., Попов Ю.А. К выбору режима напрессовки арматуры на хрупкие основания методом магнитно-импульсной формовки // Электрофизические процессы при импульсном разряде: сб. статей Чувашского гос. ун-та. – Чебоксары, 1972. – С.77-87.

19. Песоцкий В.И., Полушин А.Г., Глушечков В.А. Инженерная методика расчета величины натяга при магнитно-импульсной напрессовке // Новые технологические процессы магнитно-импульсной обработки, оборудование и инструмент: тез. докл. Всесоюз. совещания секции МИОМ. – Куйбышев, 1990. – С. 11–14.

20. Колесников С.М., Головащенко С.Ф. Методика расчета несущей способности соединений, изготовленных электромагнитным обжимом трубы на оправку с канавками // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1990. – № 5. – С. 16–20.

21. Шалунов Е.П., Попов Ю.А., Иванов Е.Г. Использование давления импульсного магнитного поля для сборки рукавов высокого давления с концевой арматурой // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – №12 – С. 13-15.

22. Rajak A.K. and Kore S.D. Numerical Simulation and Experimental Study on Electromagnetic Crimping of Aluminium Terminal to Copper Wire Strands // Electric Power Systems Research, 2017.

23. Дмитриев В.В., Лившиц Ю.Я., Розин В.И. Магнитно-импульсная обработка деталей электротехнического производства // Кузнечно-штамповочное производство. – 1984. - №7. – С. 8-9.

24. Бурмистров А.Е., Гербер С.Б., Егоров Ю.А. Использование магнитно-импульсных технологий при производстве товаров народного потребления // Магнитно-импульсная обработка материа-

лов на современном этапе: труды Первой Междунар. науч.-техн. конф. «МЕТАЛЛДЕФОРМ–99». Секция 4. – Самара, 1999. – С. 19.

25. Glouschenkov V., Karpukhin V., Pesotsky V. Achievements in magnetic pulse welding and assembly of tubular structures // Proceedings of the international conference on the joining of materials JOM-6. - Helsingor (Denmark), 1993. – P. 473-484.

26. Karpukhin V.F., Glouschenkov V.A., Mironov V.A. Magnetic-Pulse Welding // Proceedings of the international conference on the joining of materials JOM-5. – Helsingor (Denmark), 1991. – P. 241-245.

27. Bellmann J., Lueg-Althoff S., Schulze S., Gies E., Beyer A.E. Tekkaya. Measurement and analysis technologies for magnetic pulse welding. Established methods and new strategies / Adv. Manuf. – №4(4). – 2016. – P. 322-339.

28. Sapanathan T., Raoelison R.N., Buiron N. and Rachik M. (September 21st 2016). Magnetic Pulse Welding: An Innovative Joining Technology for Similar and Dissimilar Metal Pairs, Joining Technologies, Mahadzir Ishak, Intech Open, DOI: 10.5772/63525. Available from: <https://www.intechopen.com/books/joining-technologies/magnetic-pulse-welding-an-innovative-joining-technology-for-similar-and-dissimilar-metal-pairs>

29. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. – Новосибирск: Наука, 1972. – 188 с.

30. Мазуровский Б.Я. Электрогидроимпульсная запрессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов. – Киев: Наукова думка, 1980. – 172 с.

31. Трыков Ю.П. Оценка давления при сварке взрывом многослойных композиций из тонколистовых материалов // Технология сварки взрывом различных материалов и свойства полученных соединений. – М., 1970. – С. 3-7.

32. Карпухин В.Ф. Кинематические критерии образования соединения при магнитно-импульсной сварке // Новые технологиче-

ские процессы магнитно-импульсной обработки, оборудование и инструмент: тез. докл. Всесоюз. совещания секции МИОМ. – Куйбышев, 1990. – С. 27-28.

33. Карпухин В.Ф. Особенности схемы встречного метания заготовок при магнитно-импульсной сварке // Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития: труды Междунар. науч.-техн. конф. МИОМ-2007. – Самара, 2007. – С. 99–103.

34. Стрижаков Е.Л., Карандашев Н.А., Плотников В.В. Магнитно-импульсная сварка нахлесточных соединений экранирующих корпусов кабелей // Магнитно-импульсная обработка материалов на современном этапе: труды Первой Междунар. науч.-техн. конф. «МЕТАЛЛДЕФОРМ – 99», Секция 4. – Самара, 1999. – С. 89-91.

35. Vohnout V.J., Daehn G.S. and Shivpuri R. A Hybrid Quasi-Static-Dynamic Process for Increased Limiting Strains in the Forming of Large Sheet Metal Aluminum Parts, Proceedings of the Sixth ICTP. – Nuremberg, 1999. – P. 1359-1364.

36. Сапожникова Ю.А., Черников Д.Г. Гибридные и комбинированные технологии в процессах обработки металлов давлением / Электронный журнал «Труды МАИ». – Вып. 45. – 11 с.

37. Glushchenkov V., Belyaeva I. Technological schemes of hybrid and combined technologies using static and dynamic loads // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 746 KEM. – P. 246-254.

38. Belyaeva I., Jusupov R., Glushchenkov V. Problems of realization of static-dynamic technologies and ways of their solution // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 684. – P. 515-522.

39. Глушченков В.А., Беляева И.А. Особенности комбинированной операции фальцовка. Результаты компьютерного моделирования // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 2014. – №4. – С. 146-153.

40. Сборка деталей методом «фальцовки», сочетающая статическое и динамическое нагружения / В.А. Глушченков, И.А. Беляева, М.В. Хардин, Osama Al-Erhayem // Международная конференция по соединению материалов JOM 17. Хельсингор, Дания, 5-8 мая 2013. – С. 1-7.

41. Пат. №111468 РФ. МПК В21Д39/02. Устройство для фальцевого соединения листовых заготовок/ Глушченков В.А., Черников Д.Г., Хардин М.В., Беляева И.А.; заявитель и патентообладатель ГОУВПОСГАУ, ООО «НТФ «Заряд». №20111122816/02; заявл. 06.06.2011; опубл. 20.12.2011. – 3 с.

42. Беляева И.А., Глушченков В.А. Последовательность компьютерного моделирования комбинированных (статико-динамических) технологий машиностроения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18. – №4. – С. 76-81.

43. Наследственность в литых сплавах / В.И. Никитин, К.В. Никитин; изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 474 с.

44. О воздействии импульсных магнитных полей на расплавы / В.А. Глушченков, Д.Г. Черников, В.И. Никитин, К.В. Никитин // Металлургия машиностроения. – 2012. – №4. – С. 47-50.

45. Обработка расплавов магнитно-импульсными полями с целью управления структурой и свойствами промышленных силуминов / К.В. Никитин, В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин [и др.] // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2016. – № 2. – С. 34-42.

46. Chernikov D., Glushchenkov V. Changing of mechanical and technological properties of cast metal as a result of pulse-magnetic processing of melts // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 746 KEM. – P. 255-261.

47. Теоретическое и экспериментальное обоснование обработки расплавов на основе алюминия импульсными магнитными по-

лями / К.В. Никитин, Е.А. Амосов, В.И. Никитин [и др.] // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – №5. – С. 11–19.

48. Пат. № 2603412 РФ. МПК В22D 11/06. Устройство для бесслитковой прокатки жидкого металла / В.А. Глущенко, Ф.В. Гречников, Д.Г. Черников, С.С. Савин; федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» (СГАУ). № 2015104531/02; заявл. 02.10.2015; опубли. 27.11.2016.

49. Бесслитковая прокатка с магнитно-импульсной обработкой расплава / В.А. Глущенко, И.Ю. Тимошкин, Д.Г. Черников [и др.] // Металлургия машиностроения. – 2016. – № 3. – С. 26-28.

50. Металлургия алюминия / Ю.В. Борисоглебский, Г.В. Галевский, Н.М. Кулагин [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1999. – 438 с.

51. Формирование электроконтактных пробок анодов металлургического производства / В.А. Глущенко, Ф.В. Гречников, А.А. Лазарева [и др.] // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2012. – №1. – С. 20-24.

52. Пат. № 2288823 РФ. Способ сварки плавлением / Бобринский В.И., Родин Н.П., Фомичева Л.Ф., Юсупов Р.Ю., Глущенко В.А., Иголкин А.Ю. заявл. 14.02.2005., опубли. 20.12.2006.

53. Композиционные материалы: строение, получение, применение: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.

54. Methods of Compaction of the Al-B-W Powder Composition in a Metal Shell / V.A. Glushenkov, I.A. Belyaeva, F.V. Grechnikov [et al] // Russian journal of non-ferrous metals 2019. – Vol. 60. Issue 3. – P. 232-238.

55. Пат. №2695945 РФ. Способ динамических испытаний листового материала и устройство для его реализации / Глущенко

В.А., Черников Д.Г., Ерисов Я.А., Тиабашвили А.Т.; заявл. 02.06.18; опубл. 29.07.19.

56. Пат. №2695392 РФ. Способ повышения ударной вязкости металлов / Глушченков В.А.; заявл. 10.01.18; опубл. 23.07.19.

57. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлических изделий / А.В. Алифанов [и др.] // Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 9-й международ. практ. конф., Санкт-Петербург, 10–13 апр. 2007 г. – В 2 ч. – Ч. 1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 509 с.

58. Малыгин Б.В., Бень А.П. Магнитное упрочнение изделий (Теория и практика): монография. – Изд-во ХДМИ, 2009. – 350 с.

59. Пат. №2472679 РФ. Способ запуска наноспутников в качестве попутной полезной нагрузки и устройство для его осуществления / Гимранов З.И. Юсупов Р.Ю. Белоконов И.В. Глушченков В.А.; заявл. 5.05.2011; опубл. 20.01.2013.

60. Пат. №140953 РФ. Устройство отделения наноспутников в качестве попутной нагрузки / Гимранов З.И., Юсупов Р.Ю., Белоконов И.В., Глушченков В.А.; заявл. 28.11.13; опубл. 20.05.14.

61. Пат. №2603441 РФ. Способ запуска микро- и наноспутников на основе микропроцессорной магнитоиндукционной системы для осуществления запуска / Филонин О.В., Юсупов Р.Ю., Белоконов И.В., Глушченков В.А., Кострюков Е.Е., Гимранов З.И.; заявл. 11.08.15; опубл. 27.11.16.

62. Glushchenkov V.A., Yusupov R.Y. Controlled separation of nanosatellites by means of the pulsed magnetic field // Russian Aeronautics 2017. – Vol. 60. Issue 1.

63. Пат. № 2390607 РФ. Способ установки крепежных элементов на морском дне / Глушченков В.А., Юсупов Р.Ю. Кл. В02В 17/00; заявл. 04.07.2008; опубл. 27.05.2010. Бюл. №15.

64. Пат. № 75598 РФ. Установка для магнитно-импульсной обработки металлов / Юсупов Р.Ю. Глущенко В.А.; заявл. 11.03.2008; опубл. 20.08.2008.

65. Юсупов Р.Ю., Глущенко В.А. Энергетические установки для магнитно-импульсной обработки материалов: монография. – Самара: Изд. дом «Федоров», 2013. – 128 с.

66. Пат. №187435 РФ. Многопостовая магнитно-импульсная установка / Юсупов Р.Ю. Глущенко В.А.; заявл. 06.06.2018; опубл. 06.03.2019.

67. Глущенко В.А. Индукторы для магнитно-импульсной обработки материалов: учеб. пособие. – Самара: Изд. дом «Федоров», 2013. – 148 с.

68. Карпухин В.Ф. Инженерная методика расчета процессов магнитно-импульсной обработки. // Материалы Второй Международной научно-технической конференции «Металлдеформ 2004», Секция 3. – Самара, 2004. – С. 13.

69. Карпухин В.Ф. Определение параметров магнитно-импульсной формовки // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). – 2012. – №5(36). – Ч. 1. – С. 228-232.

70. Глущенко В.А., Карпухин В.Ф.. Инженерная методика расчета процессов магнитно-импульсной обработки материалов: учеб. пособие – Самара: Изд. дом «Федоров», 2018. – 64 с.

71. Литвинов В.Г., Черников Д.Г., Яшкова А.К. Автоматизированная информационная система расчета параметров процессов магнитно-импульсной обработки металлов // Перспективные информационные технологии – 2017. – С. 368-372.

72. Hallquist, J.O. A Procedure for the Solution of Finite Deformation Contact-Impact Problems by the Finite Element Method // Universi-

ty of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Rept. UCRL-52066 (1976).

73. L'Eplattenier P., Cook G., Ashcraft C. Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical Thermal Electromagnetic Simulations // Proceedings of the 3 International Conference «High Speed Forming 2008», Dortmund, 2008, p. 85-96.

Научное издание

Прокофьев Андрей Брониславович
Беляева Ирина Александровна
Глуценков Владимир Александрович
Карпухин Владимир Федорович
Черников Дмитрий Генадьевич
Юсупов Ринат Юнусович

**МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ
ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ (МИОМ)**

Монография

Редактор Н.С. Куприянова
Компьютерная верстка И.И. Спиридоновой

Подписано в печать 25.12.2019. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,14.

Тираж 500 экз (1 з-д 1-50). Заказ № 1668.

Отпечатано в типографии АНО «Издательство СНЦ».
443001, Самарская область, г. Самара, Студенческий пер., 3А.

Тел.: (846) 242-37-07, ИНН 6315944726.

E-mail: sncran@mail.ru

