

На правах рукописи



Малсугенов Роман Сергеевич

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ГАЗОВОЙ
ФОРМОВКИ С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ ТОНКОЛИСТОВЫХ
ДЕТАЛЕЙ

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО Северо-Кавказской государственной гуманитарно-технологической академии (СевКавГГТА)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологических машин и переработки материалов Северо-Кавказской государственной гуманитарно-технологической академии (СевКавГГТА) – **Боташев Анвар Юсуфович**

Официальные оппоненты:

Соболев Яков Алексеевич

доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)», кафедра машин и технологий обработки металлов давлением имени И.А. Норицына, профессор

Полькин Владислав Игоревич

кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» кафедра обработки металлов давлением, доцент

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (**ИМЕТ РАН**)

Защита состоится «19» октября 2016 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д212.132.09 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.4.

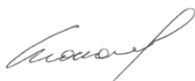
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте НИТУ «МИСиС» www.misis.ru

Автореферат разослан « » сентября 2016 года

Справки по телефону: (495)955-01-27

Е-mail: yachiyan@yandex.ru

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.132.09

 С.М. Ионов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время при изготовлении тонколистовых изделий сложного поперечного сечения и рельефной формы традиционные методы листовой штамповки принято считать эффективными в крупносерийном и массовом производствах. В тоже время, во многих отраслях промышленности, в частности пищевом, химическом, энергетическом машиностроении, самолетостроении, ракетостроении значительна доля мелкосерийных производств. Кроме того, тонкие листы из сталей и сплавов цветных металлов имеют значительную анизотропию свойств в продольном и поперечном сечении. При изготовлении тонколистовых изделий сложного поперечного сечения и рельефной формы холодная штамповка приводит к неравномерности деформации в различных сечениях и может вызвать образование дефектов в виде трещин и разрушения из-за превышения ресурса пластичности. Листовая газовая формовка при температурах горячей деформации повышает пластичность материалов и позволяет получать бездефектные изделия, однако не обеспечивает заполнение формы мелкого рельефа знакопеременной (обратной) кривизны.

Применение известного метода листовой газовой формовки и новых устройств для указанных типов изделий может обеспечить эффективное использование ее и в мелкосерийных производствах. В связи с этим, совершенствование метода листовой газовой формовки, обеспечивающей за счет применения противодействия получение деталей сложного поперечного сечения и рельефной формы знакопеременной кривизны за один технологический переход является актуальной задачей.

Работа выполнена в рамках Федеральной программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса «УМНИК» (Государственные контракты № №7352р/10161 от 28.12.2009, №8678р/13149 от 14.01.2011) и по Госзаданию Министерства образования и науки РФ (Регистрационный №7.8418.2013, № 1150128079972).

Объектом исследования являются тонколистовые детали сложного поперечного сечения и рельефной формы толщиной от 0,5 до 4 мм, с максимальным диаметром до 400 мм, изготавливаемые из стали и сплавов цветных металлов.

Предметом исследования является процесс изготовления тонколистовых деталей сложного поперечного сечения газовой формовкой с противодействием.

Целью работы является разработка технологии и оборудования для газовой формовки с противодавлением тонколистовых деталей.

Для достижения этой цели поставлены и решены следующие основные **задачи**:

- разработать конструктивную схему устройства для газовой формовки с противодавлением;
- разработать технологию изготовления деталей вышеуказанных диапазона размеров и материалов и исследовать режимы нагрева и деформирования заготовки при газовой формовке с противодавлением
- исследовать конструктивные параметры установки для газовой формовки с противодавлением в виде соотношения объемов цилиндра и матрицы, соотношения объемов камеры сгорания и матрицы, отношения диаметров цилиндра и трубопровода;
- разработать экспериментальную установку для газовой формовки с противодавлением;
- провести экспериментальные исследования с целью отладки технологических режимов нагрева и деформирования заготовки при газовой формовке с противодавлением;
- внедрить установку в производство, а также разработать конструкцию опытно-промышленной установки для газовой формовки тонколистовых деталей сложного поперечного сечения, пригодную для использования в условиях серийного производства.

Достоверность полученных результатов подтверждается сходимостью результатов теоретического анализа и экспериментальных исследований. Свидетельством их достоверности также являются детали требуемого качества, полученные в ходе экспериментальных исследований и успешным промышленным внедрением установки для газовой формовки с противодавлением на ОАО «Холодмаш».

Методика исследования. Теоретические исследования выполнены на основе уравнений теории пластичности, термодинамики, теплопроводности и конвективного теплообмена. Экспериментальные исследования проведены на оригинальном оборудовании, специально созданном для проведения данных исследований.

Научная новизна:

1. определены технологические режимы газовой формовки, позволяющие получать детали требуемого качества;
2. установлены взаимосвязи технологических режимов газовой формовки с конструктивными параметрами оборудования;

3. установлены закономерности изменения во времени температуры формируемой заготовки, позволяющие управлять процессом нагрева заготовки;
4. установлены взаимосвязи давления газовой смеси с геометрическими параметрами изготавливаемых деталей;
5. установлены соотношения механических свойств обрабатываемых материалов и режимов газовой формовки с противодавлением;
6. разработан новый тип штамповочного оборудования – установка для газовой формовки с противодавлением, осуществляющий непосредственно в полости матрицы односторонний нагрев заготовки до оптимальной температуры и последующее ее деформирование (патент на полезную модель № 150249).

Практическая значимость:

1. разработанная технология газовой формовки тонколистовых деталей сложной формы за один технологический переход, существенно снижающая себестоимость их производства;
2. на базе созданной экспериментальной установки разработана конструкция опытно-промышленной установки для газовой формовки с противодавлением, предназначенной для производства листовых деталей сложной формы (патент на полезную модель №152052);
3. отработаны технологические режимы газовой формовки типовых деталей машин и аппаратов;
4. используя экспериментальную установку для газовой формовки с противодавлением, изготовлен и испытан новый тип спирального теплообменника, обладающий высокими теплофизическими свойствами (патент на полезную модель №117596);
5. результаты работы используются в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 15.03.02 Технологические машины и оборудование, при проведении лабораторных занятий по курсам «Основы технологии машиностроения», «Теплотехника» и «Процессы и аппараты пищевых производств».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Всероссийская научно-практическая конференция «Вузовская наука Северо-Кавказскому федеральному округу» (Пятигорск, 2013); 3-й Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология» (Курск, 2013); «European Innovation Convention», «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH (Vienna, 2013); XVI Международной научно-практической конференции «Современное состояние естественных и

технических наук» (Москва, 2014); X-й Международной научной конференции «Потенциал современной науки» (Липецк, 2014); Международной научно-практической конференции (19 ноября 2015 г., г. Стерлитамак) Новая наука: Стратегии и вектор развития.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 4 в ведущих периодических изданиях, рекомендованных ВАК, а также получены 4 патента на полезные модели.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и рекомендаций, списка литературы из 116 наименований и 2 приложений. Основная часть работы изложена на 143 страницах, содержит 63 рисунка и 2 таблицы.

На защиту выносятся:

- результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров (механических свойств и толщины материала) на режимы газовой формовки (температуры, давления, времени);
- разработанная экспериментальная установка для газовой листовой формовки с противодавлением, являющаяся новым типом штамповочного оборудования, которая осуществляет односторонний нагрев заготовки до оптимальной температуры и последующее ее деформирование;
- установленные взаимосвязи конструктивных параметров разработанной установки и технологических режимов газовой формовки;
- полученные зависимости, определяющие энергосиловые характеристики процесса газовой листовой формовки;
- установленная закономерность, подтвержденная экспериментально, изменения температуры заготовки в процессе ее нагрева;
- разработанная конструкция опытно-промышленной установки для газовой листовой формовки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор и анализ известных методов газовой листовой штамповки являющихся разновидностью импульсных методов металлообработки.

Большой вклад в развитие импульсных методов металлообработки внесли работы Ю.Н. Алексеева, О.В. Антонникова,

К.Н. Богоявленского, В.К. Борисевича, А.И. Гороховича, А.А. Дерибаса, А.И. Зимина, В.Г. Кононенко, Г.П. Кузнецова, В.В. Пихтовникова, Е.А. Попова, О.В. Попова, С.М. Поляка, И.А. Чечеты, и др. Значительный вклад в развитие газовой листовой штамповки внесли работы С.П. Яковлева и его учеников.

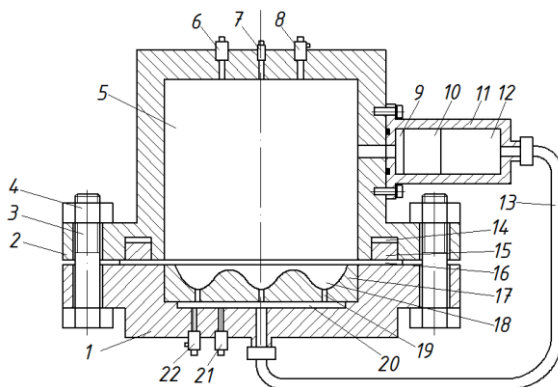
Проведенный обзор и анализ известных методов и устройств газовой штамповки показал, что в большинстве этих методов процесс штамповки осуществляется в холодном состоянии заготовки. При этом развиваемое давление газа на поверхности заготовки не достаточно для штамповки деталей сложной формы и деталей, производимых из малопластичных сплавов. Учитывая это, проведена классификация деталей, для производства которых существующие методы газовой штамповки и традиционные методы штамповки недостаточно эффективны. Для эффективного производства таких деталей необходимо создать определенные специфические условия. Это послужило основанием для разработки установки для газовой формовки с противодавлением.

Вторая глава посвящена разработке установки для газовой формовки с противодавлением. При этом методе формовки воздействием высокотемпературного газа на поверхность листовой заготовки производится интенсивный ее нагрев. При этом для предотвращения деформации заготовки с противоположной ее стороны создается противодавление также воздействием газа. После нагрева заготовки до заданной температуры осуществляется ее деформирование. Установка для осуществления данного метода может быть выполнена по двум схемам. По схеме с пневмоцилиндром и по схеме с дополнительной камерой сгорания.

Схема установки с пневмоцилиндром представлена на рисунке 1. Установка содержит матрицедержатель 1 и корпус 2 с камерой сгорания 5, стянутые между собой при помощи болтов 3 и гаек 4.

Камера сгорания 5 снабжена впускным клапаном 6, свечей зажигания 7 и выпускным клапаном 8. К корпусу 2 при помощи винтов закреплен цилиндр 11 с поршнем 10. Полость 9 цилиндра 11 сообщена с камерой сгорания 5, а полость 12 трубопроводом 13 соединена с полостью 18 матрицы 17. Формуемая заготовка 16 зажимается между матрицедержателем 1 и корпусом 2. В нижней части матрицедержателя установлены впускной клапан 21 и выпускной клапан 22.

Работа установки осуществляется следующим образом. В полость 18 матрицы 17 через клапан 21 подается сжатый воздух, который через трубопровод 13 поступает и в полость 12 цилиндра 11.



1 – матрицедержатель; 2 – корпус; 3 – болт; 4 – гайка; 5 – камера сгорания; 6,21 – впускные клапаны; 7 – свеча зажигания; 8,22 – выпускные клапаны; 9,12,20 – полости; 10 – поршень; 11 – цилиндр; 13 – трубопровод; 14 – кольцевая полость; 15 – кольцевой поршень; 16 – заготовка; 17 – матрица; 18 – полость матрицы; 19 – канал

Рисунок 1 – Схема установки для газовой формовки с пневмоцилиндром

Одновременно через клапан 6 в камеру сгорания 5 подаются компоненты топливной смеси: горючий газ и сжатый воздух. Давление топливной смеси в камере сгорания 5 устанавливается равным давлению воздуха в полости 18 матрицы 17. Топливная смесь при помощи свечи 7 поджигается. В процессе горения топливной смеси давление в камере сгорания 5 повышается. Это давление передается и в полость 9 цилиндра 11. При этом под действием давления газа поршень 10 перемещается, вытесняя воздух из полости 12 в полость 18 матрицы 17. Благодаря этому в процессе горения топливной смеси в камере сгорания 5 обеспечивается увеличение давления в полости 18 матрицы 17, что ограничивает деформацию заготовки 16 и предотвращает контакт её с поверхностью матрицы. После окончания процесса сгорания топливной смеси заготовка 16 еще некоторое время остается под воздействием продуктов сгорания и интенсивно нагревается. При достижении ее температуры заданного интервала температуры открывается клапан 22, и воздух из полостей 18 и 20 выпускается. Давление в полости 18 матрицы 17 падает. При этом под действием давления продуктов сгорания заготовка 16 деформируется и заполняет полость 18 матрицы 17 – осуществляется процесс формовки.

Для осуществления процесса формовки необходимо создать на поверхности заготовки соответствующее давление газа. Поперечные размеры формующей заготовки во много раз превышают ее толщину. Поэтому формующую заготовку можно рассматривать как тонкую оболочку, нагруженную давлением газа. Тогда для определения необходимой величины давления газа для осуществления процесса формовки можно использовать известное уравнение Лапласа для тонкой оболочки.

Используя это уравнение и условие пластичности, получены зависимости для определения давления формовки для различных типов деталей. В частности, для случая формовки сферообразного днища эта зависимость имеет следующий вид:

$$P_{\phi} = \frac{4h\delta}{0,25 d^2 + h^2} \sigma_s, \quad (1)$$

где P_{ϕ} – давление формовки, Па; d – диаметр днища, м; h – высота днища, м;

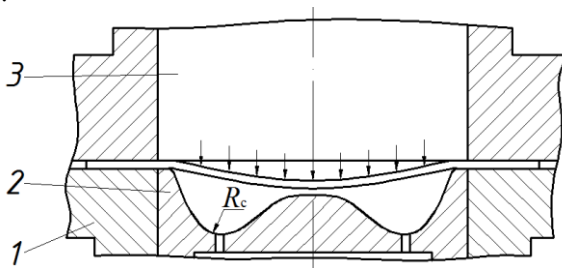
δ – толщина заготовки, м; σ_s – предел текучести материала заготовки, Па.

При формовке деталей цилиндрической формы наибольшее давление газа требуется для обеспечения заполнения заготовкой углов донной части матрицы. Давление формовки для этой стадии можно определить по следующей зависимости:

$$P_{\phi} = \frac{\delta}{R_3} \sigma_s, \quad (2)$$

где R_3 – радиус закругления донной части детали, м.

При формовке детали, имеющей поверхность двойной кривизны, в начальный период происходит свободная формовка. Затем происходит заполнение пространства между вогнутой и выпуклой поверхностями матрицы. В конечной стадии процесса происходит формовка поверхности сопряжения вогнутой и выпуклой поверхностей (рисунок 2).



1 – матрицедержатель; 2 – матрица; 3 – камера сгорания

Рисунок 2 – Схема формовки детали с поверхностью двойной кривизны

Давление формовки для этой стадии определяется следующей зависимостью:

$$P_{\phi} = \frac{\delta}{R_c} \sigma_s, \quad (3)$$

где R_c - радиус сопряжения вогнутой и выпуклой поверхностей детали, м.

При формовке спиральных или змеевиковых каналов панелей теплообменников наибольшее давление необходимо создать для заполнения зон А (рисунок 3). Величину этого давления можно определить по следующей зависимости:

$$P_{\phi} = \frac{2\delta}{R_k} \sigma_s, \quad (4)$$

где R_k - радиус поперечного сечения канала, м.

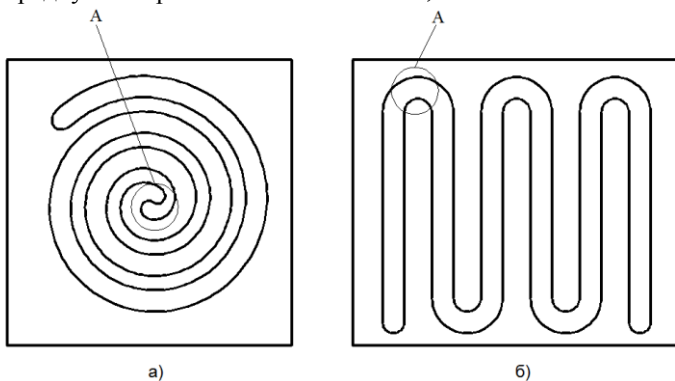


Рисунок 3 – Панели теплообменника со спиральным (а) и змеевиковым (б) каналами

При формовке детали с мелким рельефом наибольшее давление газа требуется для формовки участков с минимальными радиусами кривизны. Это давление может быть определено по следующей зависимости:

$$P_{\phi} = \frac{2\delta}{R_{min}} \sigma_s, \quad (5)$$

где R_{min} – минимальный радиус кривизны поверхности детали, м.

Зависимости (1) - (5) позволяют определить для различных типов деталей необходимую величину давления газа в конце процесса формовки. Для обеспечения этого давления необходимо установить соответствующее значение давления топливной смеси. В процессе сгорания топливной смеси давление многократно увеличивается. После окончания процесса горения в период нагрева заготовки давление монотонно снижается. С учетом этих факторов необходимая величина

давления топливной смеси может быть определена по следующей зависимости:

$$P_c = \frac{aP_\Phi}{\lambda_V} \left(1 - 0,1 \frac{\tau_n}{\tau_z}\right)^{-1}, \quad (6)$$

где λ_V - степень повышения давления при сгорании топливной смеси в замкнутом объеме; τ_n - время нагрева заготовки после окончания процесса горения, с; τ_z - время сгорания топливной смеси, с; a - коэффициент, зависящий от объема формуемой детали.

Зависимости (1) - (6) позволяют определить необходимую величину давления топливной смеси для формовки различных типов деталей. При этом величину предела текучести σ_s , входящего в эти зависимости, следует принимать с учетом нагрева заготовки. Необходимо также знать время нагрева заготовки τ_n . В этой связи проведено теоретическое исследование процесса нагрева заготовки.

В процессе нагрева листовая заготовка практически не деформируется. Поэтому заготовку можно рассматривать как тонкую пластину. Следовательно, исследуемый процесс можно рассматривать как нагрев тонкой пластины односторонним воздействием горячего газа. Исследование проведено при следующих допущениях: отсутствует отвод теплоты от заготовки; подвод теплоты к заготовке происходит только за счет конвективного теплообмена с горячим газом; тепловые потоки на единицу поверхности заготовки и камеры сгорания одинаковы. Исследование проведено на базе уравнения теплоотдачи Ньютона-Рихмана и уравнения теплового баланса:

$$dQ_3 = \alpha F_3 (t_r - t_3) dt, \quad (7)$$

$$dQ_3 + dQ_c = \rho_r V_K c_r dt_r, \quad (8)$$

где dQ_3, dQ_c - элементарные количества теплоты, переданные газом заготовке и стенке камеры сгорания за время dt , Дж; F_3 - площадь тепловоспринимающей поверхности заготовки, m^2 ; t_r - температура газа, $^{\circ}C$; t_3 - температура заготовки, $^{\circ}C$; α - коэффициент теплоотдачи, $Вт/м^2K$; ρ_r - плотность газа, находящегося в камере сгорания, $кг/м^3$; c_r - удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, $Дж/(кг \cdot K)$; V_K - объем камеры сгорания, $м^3$. Количества теплоты, воспринимаемые заготовкой и стенкой камеры сгорания связаны между собой следующим соотношением:

$$dQ_c = \frac{F_c}{F_3} dQ_3, \quad (9)$$

где F_c - площадь поверхности стенок камеры сгорания, $м^2$. Количество теплоты, полученное заготовкой, идет на повышение ее температуры, поэтому:

$$dQ_3 = \rho_3 F_3 \delta c_3 dt_3. \quad (10)$$

где ρ_3 – плотность материала заготовки, кг/м³; c_3 – удельная теплоемкость заготовки, Дж/(кг·К). Из уравнений (7) – (10) после соответствующих преобразований получена следующая зависимость:

$$t_3 = \frac{1}{b+1} \left[t_z \left(1 - e^{\frac{\alpha(b+1)\tau}{\rho_3 c_3 \delta}} \right) + t_{30} \left(b + e^{-\frac{\alpha(b+1)\tau}{\rho_3 c_3 \delta}} \right) \right]. \quad (11)$$

$$b = \frac{F_c + F_3}{F_3} \frac{\rho_3 \delta F_3 c_3}{\rho_r c_r V_K}, \quad (12)$$

где t_z – начальная температура газа, равная температуре конца процесса сгорания, °С; t_{30} – начальная температура заготовки, °С. Эта зависимость выражает закономерность изменения температуры заготовки во времени. На рисунке 4 представлены графики изменения во времени температуры стальной заготовки при различных давлениях топливной смеси, построенные по зависимости (11).

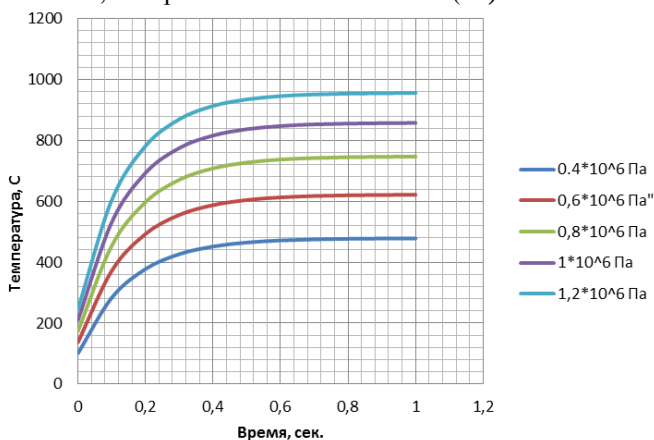


Рисунок 4 – Графики зависимости температуры нагрева стальной заготовки толщиной 0,5 мм от времени при различных давлениях топливной смеси

Как видно из графиков температура заготовки интенсивно повышается при увеличении времени нагрева до 0,4...0,5 с. При дальнейшем увеличении времени нагрева интенсивность роста температуры заготовки непрерывно снижается, а при длительности нагрева 0,8...0,9 с температура заготовки достигает максимального значения. Поэтому оптимальное значение времени нагрева заготовки составляет 0,4...0,5 с.

В третьей главе проведено теоретическое исследование рабочего процесса установки для газовой формовки с противодавлением. Схема установки приведена на рисунке 1.

Исследование проведено для оптимизации параметров установки. Рабочий процесс установки для формовки состоит из процесса сгорания топливной смеси в камере сгорания и процесса сжатия воздуха в цилиндре. Эти процессы должны быть взаимосвязаны для того, чтобы обеспечить примерное равенство давлений в камере сгорания и полости матрицы к концу процесса сгорания.

Для описания закона изменения давления в камере сгорания использован закон выгорания топливной смеси в форме уравнения Вибе:

$$x = 1 - e^{-6,906(\tau\tau_z^{-1})^{m+1}}, \quad (13)$$

где x – доля сгоревшего топлива к данному моменту времени; m – показатель характера сгорания; τ_z – время полного сгорания топлива, с; τ – текущее значение времени, с. Давление в конце процесса сгорания можно определить по следующей зависимости:

$$P_z = \lambda_V P_c. \quad (14)$$

Введя безразмерное давление $\bar{P}_k$ и безразмерное время $\bar{\tau}$:

$$\bar{P}_k = \frac{P_k}{P_c}, \quad \bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_z}, \quad (15)$$

а также учитывая зависимость (14), из уравнения (13) получена зависимость, описывающая закон изменения давления в камере сгорания в безразмерном виде:

$$\bar{P}_k = \alpha_k [1 + (\lambda_V - 1)(1 - e^{-6,906\bar{\tau}^{m+1}})]. \quad (16)$$

В этой зависимости поправочный коэффициент α_k учитывает расширение продуктов сгорания в полости 9 при перемещении поршня 10.

Процесс сжатия воздуха, ввиду его быстротечности, можно считать адиабатическим. Тогда можно записать:

$$P_c V_0^{k_B} = P_B V_B^{k_B}, \quad (17)$$

где V_0 – начальный объем воздуха, м³; V_B , P_B – текущие значения объема и давления воздуха, м³, Па; k_B – показатель адиабаты воздуха.

Уравнение движения поршня имеет следующий вид:

$$\frac{dW}{d\tau} = \frac{f_{\text{ц}}}{m} (P_k - P_{\text{ц}}), \quad (18)$$

где W , m – скорость и масса поршня, м/с, кг; P_k – давление в камере сгорания, Па; $P_{\text{ц}}$ – давление воздуха в цилиндре, Па; $f_{\text{ц}}$ – площадь поперечного сечения цилиндра, м². Введем безразмерные величины

$$\bar{P}_{\text{ц}} = P_{\text{ц}}/P_c, \quad v_{\text{ц}} = h_{\text{п}} f_{\text{ц}}/V_0, \quad (19)$$

где $\bar{P}_{\text{ц}}$ – безразмерное давление воздуха в цилиндре; $v_{\text{ц}}$ – относительный объем цилиндра. Решая совместно уравнения (17) и (18) с учетом соотношений (15), (19), получена зависимость, описывающая в безразмерном виде закон изменения давления воздуха в цилиндре:

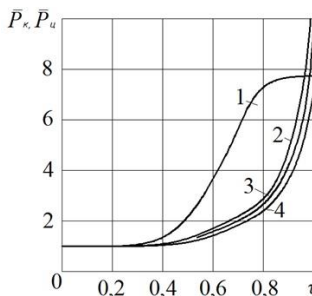
$$\bar{P}_c = (1 - v_{\text{ц}} \bar{t}^2)^{-k_{\text{в}}}. \quad (20)$$

Эта зависимость описывает также изменение давления воздуха в полости матрицы, так как оно практически не отличается от давления воздуха в цилиндре.

На рисунке 5 представлены графики изменения безразмерного давления газа в камере сгорания (кривая 1) и цилиндре при различных значениях относительного объема цилиндра $v_{\text{ц}}$. Из графиков видно, что в начальный период давление в обеих полостях повышается очень медленно. Существенное его увеличение начинается при $\tau > 0,4$, при этом давление в камере сгорания повышается интенсивнее, чем в цилиндре. В конечной стадии процесса сгорания топливной смеси, т.е. при $\tau > 0,8$, интенсивность роста давления в камере сгорания существенно снижается, а в цилиндре значительно повышается. Максимальное значение давления в цилиндре существенно зависит от величины относительного объема цилиндра $v_{\text{ц}}$. Если величина $v_{\text{ц}}$ составляет порядка 0,78 и выше, то в конечной стадии процесса сгорания давление в цилиндре становится выше, чем в камере сгорания. Это происходит за счет накопленной кинетической энергии поршня. Небольшое превышение давления воздуха над давлением в камере сгорания играет положительную роль, так как предотвращает контакт заготовки с поверхностью матрицы.

Исходя из анализа графиков на рисунке 5 можно заключить, что величину относительного объема цилиндра $v_{\text{ц}}$ целесообразно ограничить в пределах 0,80...0,82. Следовательно, в соответствии с зависимостью (19) объем цилиндра должен быть в 4...4,5 раза больше суммарного объема полости матрицы и трубопровода, соединяющего матрицу с цилиндром. При этом целесообразно полный ход поршня ограничить в пределах 0,35...0,45 м, а диаметр цилиндра определить по следующей зависимости:

$$D_{\text{ц}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} V_{\text{м}} \left(l_{\text{ц}} \frac{1-v_{\text{ц}}}{v_{\text{ц}}} - l_{\text{т}} d_{\text{т}}^2 \right)}, \quad (21)$$

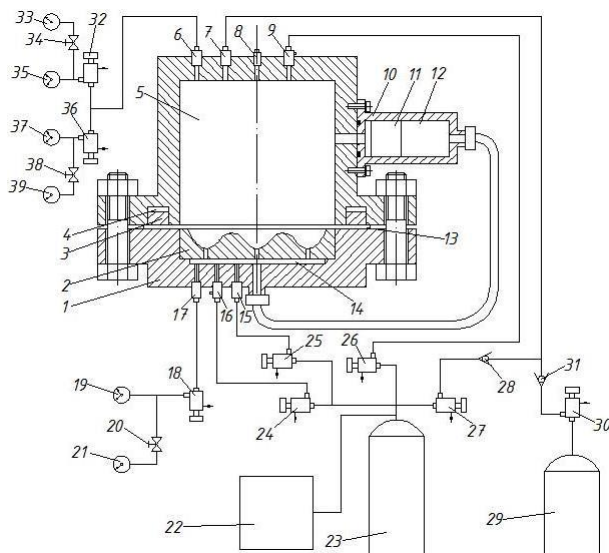


2 – $v_{\text{ц}} = 0,82$; 3 – $v_{\text{ц}} = 0,80$; 4 – $v_{\text{ц}} = 0,75$.

Рисунок 5 – Изменение во времени безразмерного давления в камере сгорания (кривая 1) и цилиндре

где d_T - диаметр трубопровода, м.

В четвертой главе проведены экспериментальные исследования процесса газовой формовки с противодавлением. Целью этих исследований являлась проверка достоверности результатов теоретического анализа, а также отработка технологических режимов процесса газовой формовки с противодавлением. Эксперименты проводили на экспериментальной установке, представленной на рисунке 6.



1 – матрицедержатель; 2 – матрица; 3 – кольцевой поршень; 4 – кольцевая полость; 5 – камера сгорания; 6, 17 – предохранительные клапаны; 7, 15 – впускные клапаны; 8 – свеча зажигания; 9, 16 – выпускные клапаны; 10 – цилиндр; 11 – поршень; 12, 14 – полости; 13 – заготовка; 18, 25, 26, 27, 30, 32, 36 – электропневматические клапаны; 19, 35, 37 – электро-контактные манометры; 20, 34, 38 – вентили; 21, 33, 39 – образцовые манометры; 22 – компрессор; 23 – ресивер; 28, 31 – обратные клапаны; 29 – баллон с газом

Рисунок 6 – Схема экспериментальной установки для газовой формовки с системой топливоподачи

Установка включает в себя устройство для газовой формовки и системы топливоподачи, зажигания и управления. В качестве энергоносителя использовался стехиометрическая смесь пропан-бутана с воздухом. В процессе экспериментов формовке подвергали листовые

заготовки из алюминия марки А5М толщиной 0,5 мм, 1 мм, 2 мм и заготовки из стали 3 толщиной 0,5 мм и 1 мм. В ходе экспериментов варьировали давление топливной смеси в пределах 0,3...0,7 МПа, время нагрева заготовки в пределах 0,3...0,8 с и давление прижима фланцевой части заготовки в пределах 1,5...7 МПа. При этом производили отработку технологии формовки следующих типов деталей: сферообразного днища, сферообразного днища с плоским дном, сферообразного днища с центральным углублением, цилиндрической детали с фланцем, детали с поверхностью двойной кривизны, детали с мелким рельефом и панели теплообменника со спиральным каналом.

Для проверки приемлемости зависимости (1) была проведена формовка сферообразного днища с плоским дном из стальной заготовки толщиной 1 мм. Диаметр днища составляет 400 мм, а его высота – 80 мм. Формовку производили при давлении топливной смеси 0,3 МПа, время нагрева заготовки составляло 0,4 с. При этом согласно зависимости (11) температура заготовки составляла порядка 250 °С. При этой температуре предел текучести заготовки из стали 3 составляет около 190 МПа. При этих данных, учитывая, что $\tau_n = 0,4$ с, $\tau_z = 0,1$ с, по зависимостям (1), (6) получим $P_c = 0,27$ МПа, что удовлетворительно согласуется с экспериментальным значением давления топливной смеси (расхождение их составляет 10%).

На рисунке 7 представлено сферообразное днище с центральным углублением, полученное из стальной заготовки толщиной 0,5 мм. В центре днища имеется лунка диаметром 65 мм и глубиной 12,5 мм. Формовку днища производили при давлении топливной смеси 0,6 МПа и времени нагрева заготовки 0,4 с. При этом согласно зависимости (11) температура заготовки при формовке составляла 550...600 °С, т.е. находилась в интервале температур тепловой обработки стали. При такой температуре предел текучести стали 3 составляет около 50 МПа. Давление формовки в данном случае лимитируется параметрами центрального углубления ($d = 0,065$ м, $h = 0,0125$ м). Значение давления топливной смеси, полученное по зависимостям (1) и (6) применительно к центральному углублению, составляет 0,52 МПа, т.е. отличается от фактического его значения всего на 13,5 %.



Рисунок 7 – Сферообразное днище с центральным углублением из стали

Формовку детали цилиндрической формы производили из алюминиевой заготовки толщиной 1 мм. Для уменьшения утонения стенки детали в зоне закругления донной части формовку производили в два этапа. На первом этапе в полость матрицы подавали сжатый воздух давлением 0,6 МПа. При этом под действием давления воздуха происходила вытяжка заготовки в направлении камеры сгорания, сопровождаемая течением металла с фланцевой части заготовки. Затем воздух из полости матрицы выпускали. На втором этапе камеру сгорания наполняли топливной смесью давлением 0,4 МПа, а полость матрицы наполняли сжатым воздухом давлением 0,4 МПа. Далее совершался рабочий цикл устройства. При этом время нагрева заготовки составляло 0,4 с. Температура заготовки согласно зависимости (11) составляла около 350 °С. Деформирование заготовки в два этапа позволило уменьшить утонение стенки детали в донной ее части до 15 %.

Деталь с поверхностью двойной кривизны формовали из алюминиевой заготовки толщиной 1 мм. Диаметр детали составляет 400 мм, а высота – 60 мм. Формовку так же, как и в предыдущем случае производили в два этапа для уменьшения утонения центральной зоны детали. На первом этапе давление воздуха в полости матрицы составляло 0,8 МПа. На втором этапе формовку осуществляли при давлении топливной смеси 0,5 МПа, время нагрева заготовки составляло 0,4 с. При этом температура заготовки согласно зависимости (11) составляла около 400 °С. Деформирование заготовки в два этапа, обеспечило получение детали требуемого качества.

На рисунке 8 представлена панель теплообменника со спиральным каналом, имеющим форму спирали Архимеда с шагом 50 мм. Ширина канала составляет 30 мм, а глубина – 12 мм, при этом радиус кривизны поперечного сечения канала составляет 15,5 мм. Формовку панели производили из алюминиевой заготовки толщиной 1 мм при давлении топливной смеси 0,5 МПа, время нагрева заготовки составляло 0,4 с. При этом температура заготовки согласно зависимости (11) составляла около 400 °С. При такой температуре предел текучести

алюминия А5М существенно не отличается от предела прочности, который составляет около 16 МПа. При этих данных по зависимостям (4) и (6) получим $P_c = 0,43$ МПа. Полученное значение давления топливной смеси существенно не отличается от его фактического значения, их расхождение составляет 14 %.

Формовку панели теплообменника производили также из алюминиевой заготовки толщиной 2 мм. Формовку осуществляли при давлении топливной смеси 0,7 МПа, время нагрева заготовки составляло 0,4 с. Форма полученной панели близка к форме панели, представленной на рис. 8, но глубина канала составляет 8 мм. Для формовки канала глубиной 12...13 мм давление топливной смеси должно быть порядка 0,9 МПа, однако экспериментальная установка не обеспечивала такое давление.

На рисунке 9 представлена деталь со сложным мелким рельефом, полученная из алюминиевой заготовки толщиной 1 мм. Формовка осуществлялась при давлении топливной смеси 0,5 МПа, время нагрева заготовки составляло 0,4 с. Форма полученной детали полностью соответствовала форме матрицы. Полученный результат позволяет заключить, что данный метод формовки может быть также использован для производства изделий, изготавливаемых чеканкой.



Рисунок 8 – Панель теплообменника со спиральным каналом из алюминиевой (А5М) заготовки толщиной 1мм



Рисунок 9 – Деталь со сложным мелким рельефом

Для оценки температуры формируемой заготовки были также проведены экспериментальные исследования процесса нагрева заготовки. При этом для определения максимальной температуры нагрева заготовки были использованы термокраски, расплавляющиеся при определенной температуре. На заготовку наносили три семейства параллельных линий. Каждое семейство состояло из 6 линий,

отстоящих друг от друга на 10 мм. Расстояние между соседними семействами линий составляло 60 мм. Чувствительность на температуру линий каждого семейства отличалась на 50 °С. Каждое семейство линий охватывало интервал температур от 350 °С до 600 °С. Эксперименты проводили на заготовке толщиной 0,5 мм из стали 3 и заготовке толщиной 1 мм из алюминия А5М при давлении топливной смеси 0,6 МПа. При этом варьировали время нагрева заготовки τ , т.е. оно составляло 0,2 с; 0,4 с; 0,6 с; 0,8 с.

Результаты экспериментов, проведенных на стальной заготовке, представлены на рисунке 10. Каждая точка, изображенная на этом рисунке, представляет усредненное значение температуры заготовки по результатам трех экспериментов, проведенных при одном и том же значении времени нагрева заготовки. Температуры заготовки при длительности ее нагрева 0,6 и 0,8 с существенно не отличаются друг от друга. Следовательно, в течение 0,6 с нагрев заготовки практически завершается. На рисунке 10 приведен также график зависимости температуры заготовки от времени ее нагрева, полученный расчетом по зависимости (11). Сопоставление графика с экспериментальными точками показывает, что расхождение расчетных значений температуры от экспериментальных не превышает 13 %. Аналогичные результаты получены и на экспериментах, проведенных на алюминиевых заготовках (расхождение не превышает 11%).

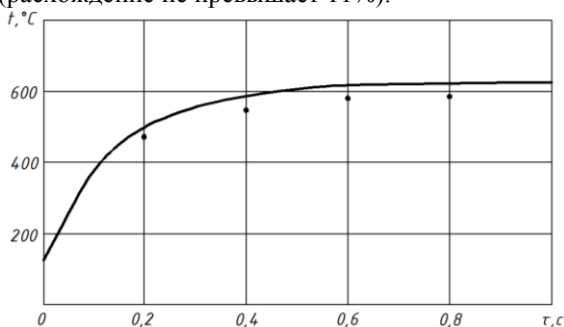


Рисунок 10 – Зависимость температуры стальной заготовки толщиной 0,5 мм от длительности ее нагрева (точками отмечены экспериментальные значения температуры)

Проведенные экспериментальные исследования в целом подтвердили правильность основных результатов теоретического анализа. Полученные зависимости вполне приемлемы для определения необходимой величины давления топливной смеси и температуры нагрева заготовки. В ходе экспериментальных исследований отработана

технология газовой формовки типовых деталей. Полученные при этом детали имеют хорошее качество, что свидетельствует о возможности использования данного метода формовки в промышленном производстве.

Пятая глава посвящена разработке и созданию оборудования для газовой формовки с противодавлением. Для практической апробации разработанного метода формовки была разработана, изготовлена и смонтирована экспериментальная установка для газовой формовки. Конструкция установки выполнена по схеме, представленной на рисунке 1. Фотография установки показана на рисунке 11.

После осуществления сборки и монтажа экспериментальной установки были проведены ее испытания. При этом проверялось обеспечение герметичности рабочих полостей установки, плавность перемещения поршня и безударность его останова, а также функционирование системы топливopодачи. Проведенные испытания в целом подтвердили работоспособность и безопасность экспериментальной установки для газовой формовки.

Технология получения тонкостенных деталей сложной формы включает следующие технологические операции:

- раскрой тонколистового материала на заготовки;
- установка заготовки в пространство между камерой сгорания и матрицей;
- прижим фланцевой части заготовки кольцевым поршнем;
- подача компонентов топливной смеси в камеру сгорания и подача сжатого воздуха в полость матрицы;
- поджиг топливной смеси;
- нагрев заготовки;
- выпуск сжатого воздуха из полости матрицы;
- деформирование заготовки;
- выпуск продуктов сгорания из камеры сгорания;
- разбор установки и изъятие отформованной детали.

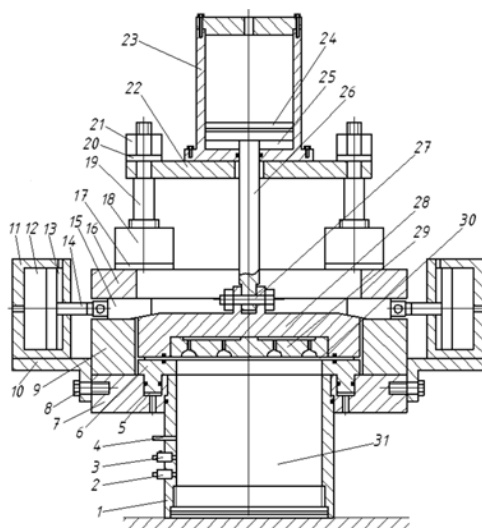
Полученные по новой технологии детали требуемого качества позволили рекомендовать ее для использования в промышленном производстве. На устройство для реализации данной технологии получен патент РФ № 150249. Установка внедрена в производство в ОАО «Холодмаш» для производства деталей холодильных машин. Установка используется в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 15.03.02 Технологические машины и оборудование.



Рисунок 11 – Экспериментальная установка для газовой формовки с противодавлением

Разработанные технология и оборудование для газовой формовки использована также для изготовления спирального теплообменника оригинальной конструкции (патент на полезную модель №117596). Испытание опытного образца теплообменника показало, что он обладает высокими теплофизическими характеристиками и может эффективно использоваться в пищевой отрасли. Теплообменник внедрен в учебный процесс подготовки бакалавров по направлению 15.03.02 Технологические машины и оборудование.

На основе экспериментальной установки разработана конструкция опытно-промышленной установки для газовой формовки (рисунок 12). В ней в отличие от экспериментальной установки фиксация положения матрицы относительно камеры сгорания осуществляется при помощи клинового механизма. Это позволяет существенно сократить время, затрачиваемое на установку заготовки на матрицу и снятие с нее готовой детали. Благодаря этому данная установка имеет высокую производительность и может использоваться и в крупносерийном производстве. Установка позволяет формовать детали диаметром до 550 мм из стального листа толщиной до 2 мм и из листа толщиной до 5 мм из цветных сплавов. На конструкцию разработанной опытно-промышленной установки получен патент на полезную модель №152052.



1 – корпус камеры сгорания; 2 – впускной клапан; 3 – выпускной клапан; 4 – свеча зажигания; 5 – кольцевая полость; 6 – прижим; 7, 16, 22 – плиты; 8 – болт; 9 – брус; 10 – опора цилиндра; 11 – пневмоцилиндр клинового затвора; 12, 13 – полости; 14 – шток с поршнем; 15 – клиновой затвор; 17, 20 – шайбы; 18, 21 – гайки; 19 – двухступенчатая шпилька; 23 – пневмоцилиндр; 24 – поршень; 25 – полость; 26 – шток; 27 – палец; 28 – матрицедержатель; 29 – матрица; 30 – заготовка; 31 – камера сгорания.

Рисунок 12 – Схема промышленной установка для газовой формовки с клиновым механизмом для фиксации матрицы (патент на полезную модель №152052)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В процессе выполнения диссертационного исследования были получены следующие основные результаты:

1. Разработана конструктивная схема устройства для газовой формовки с противодавлением.
2. Разработана технология изготовления деталей вышеуказанных диапазона размеров и материалов в виде последовательности выполнения переходов и исследованы режимы нагрева и деформирования заготовки при газовой формовке с противодавлением; установлена закономерность изменения во времени температуры формируемой заготовки, позволяющая управлять процессом нагрева

заготовки; разработаны технологические режимы нагрева и деформирования заготовки при газовой формовке с противодавлением для деталей: днище из стали 3 – давление топливной смеси 0,3 МПа, время нагрева – 0,4 с, панели спирального теплообменника из алюминия А5М – давление топливной смеси 0,5 МПа, время нагрева – 0,4 с, детали цилиндрической формы из алюминия А5М – давление топливной смеси 0,4 МПа, время нагрева 0,4 с.

3. Исследованы конструктивные параметры установки для газовой формовки с противодавлением и определены их оптимальные соотношения: соотношение объемов цилиндра и матрицы должно быть в пределах 4...4,5, соотношение объемов камеры сгорания и матрицы в пределах 10...15, отношение диаметров цилиндра и трубопровода, соединяющего цилиндр с матрицей, в пределах 4...5, что в целом обеспечивает благоприятные условия для нагрева и деформирования заготовки.

4. Разработана экспериментальная установка для газовой формовки с противодавлением, обеспечивающая получение деталей требуемого качества.

5. Проведены экспериментальные исследования газовой формовки и отлажены ее технологические режимы, при этом получены детали: днище из стали 3, панель спирального теплообменника из алюминия А5М и деталь цилиндрической формы из алюминия А5М.

6. Экспериментальная установка (патент на полезную модель № 150249) успешно внедрена в производство на ОАО «Холодмаш», также разработана опытно-промышленная установка для газовой формовки тонколистовых деталей сложного поперечного сечения для использования в условиях серийного производства, защищенная патентом РФ № 152052.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Боташев, А.Ю. Разработка и исследование устройства для газовой штамповки с односторонним нагревом заготовки [Текст] / А. Ю. Боташев, Н. У. Бисилов, Р. С. Малсугенов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. - 2014. - № 7. - С. 28 - 34.
2. Боташев, А.Ю. Исследование процесса нагрева заготовки при газовой листовой штамповке [Текст] / А. Ю. Боташев, Н. У. Бисилов, Р. С. Малсугенов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. - 2014. - № 5. - С. 20 - 24.
3. Боташев, А.Ю. Экспериментальные исследования газовой штамповки с двухсторонним нагревом заготовки [Текст] / А. Ю.

Боташев, Н. У. Бисилов, Р. С. Малсугенов // Заготовительные производства в машиностроении. - 2014. - №1. - С. 17-19.

4. Боташев, А.Ю. Разработка и исследование нового метода листовой штамповки [Текст] / А. Ю. Боташев, Н. У. Бисилов, Р. С. Малсугенов// Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. -№ 1. – С. 31-34.

Патенты:

5. Пат. 117596 Российская Федерация, RU 117596 МПК F28 D 9/04. Спиральный теплообменник, патент на полезную модель / А. Ю. Боташев, Р.С. Малсугенов опубл. 27.16.2012, Бюл. №18.

6. Пат. 152052 Российская Федерация, RU 152052 МПК B21 D 26/08. Устройство для листовой штамповки взрывом газовых смесей, патент на полезную модель / А. Ю. Боташев, Н. У. Бисилов, Р. С. Малсугенов; опубл. 27.04.2015, Бюл. №12.

7. Пат. 150249 Российская Федерация, RU 150249 МПК B21 D 22/00. Устройство для листовой штамповки взрывом газовых смесей, патент на полезную модель / А. Ю. Боташев, Н. У. Бисилов, Р. С. Малсугенов; опубл. 10.02.2015, Бюл. №4.

8. Пат. 160282 Российская Федерация, RU 160282 МПК B21 D 26/08. Устройство для листовой штамповки взрывом газовых смесей, патент на полезную модель / А. Ю. Боташев, Р.С. Малсугенов опубл. 10.03.2016, Бюл. №7.

Статьи и материалы конференций:

9. Малсугенов, Р.С. Разработка устройства для газовой штамповки панелей спиральных теплообменников [Текст] / Р. С. Малсугенов // Современное состояние естественных и технических наук: материалы XVI Международной научно-практической конференции (15.09.2014). – М.: Издательство «Спутник+», 2014. – С. 36-41.

10. Малсугенов, Р.С. Определение проходного сечения выпускного клапана устройства для газовой штамповки с нагревом заготовки [Текст] / Р.С. Малсугенов // Новая наука: Стратегии и вектор развития: Международное научное периодическое издание по итогам Международной научно-практической конференции (19 ноября 2015 г., г. Sterlitaмак). /в 2 ч. Ч.2 - Sterlitaмак: РИЦ АМИ, 2015. – С. 148-153.

11. Малсугенов, Р.С. Разработка, создание и испытание устройства для газовой штамповки с противодавлением [Текст] / Р.С. Малсугенов // Развитие технических наук в современном мире / Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. Воронеж, 2015.