

Сережкин Михаил Александрович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ  
ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД1

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2018

Работа выполнена в Московском федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана» (национальном исследовательском университете) (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: Ступников Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: Абрамов Алексей Николаевич  
доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедения и физики материалов», ФГБОУ ВО Уфимский государственный авиационный технический университет

Типалин Сергей Александрович  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Обработка металлов давлением и аддитивные технологии», ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_» 2018 г. в \_\_\_\_\_  
на заседании диссертационного совета Д 212.141.04 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская, 5.

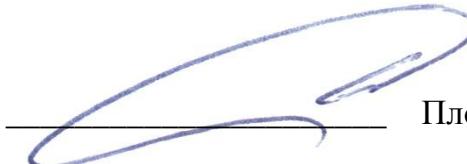
Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_\_» 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.141.04  
к.т.н., доцент



Плохих А.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Полые детали из листовых заготовок широко применяют в конструкциях изделий в различных отраслях промышленности, например, сферические элементы плавучего понтона из материала АД1, используемые при хранении и транспортировки лёгких углеводородов (бензинов, керосинов и т.д.) и применение которых снижает потери углеводородов, повышает безопасность их хранения, оказывает положительное влияние на экологию. При этом требуется обеспечить высокое качество поверхности изготавливаемой детали и высокую стойкость инструмента в условиях массового производства.

Такие детали обычно изготавливают с помощью формообразующих операций холодной листовой штамповки: вытяжки, обжима, формовки и другие. Теория и практика листовой штамповки широко представлена в трудах ведущих отечественных и зарубежных учёных: Попова Е.А., Исаченкова Е.И., Мельникова Э.Л., Зубцова М.Е., Корсакова В.Д., Романовского В.П., Аверкиева А.Ю., Вайнтрауба Д.А., Шофмана Л.А., Ункрова Е.П., Райтберга Л.Х., Чертавского А.К., Томсена Э. и другими.

При изготовлении полых деталей из алюминиевых сплавов часто наблюдается налипание – перенос частиц материала заготовки на инструмент, что приводит к искажению геометрических размеров, снижению качества и ухудшению эксплуатационных характеристик изготавливаемых деталей, а также к уменьшению стойкости инструмента. Повышение качества деталей и стойкости инструмента может осуществляться путём устранения налипания, которое достигается применением новых смазочных материалов, нанесением специальных покрытий на рабочие поверхности штампов, снижением шероховатости штампового инструмента, а также другими способами.

Однако недостаточная изученность особенностей процесса налипания заготовки на инструмент, и вследствие этого отсутствие методик проектирования технологических процессов, учитывающих состояние поверхности заготовки и инструмента, а также условия деформирования заготовки, негативно влияет на качество деталей и стойкость инструмента.

В связи с этим исследования, направленные на совершенствование технологических процессов вытяжки листовых заготовок из алюминиевых сплавов за счёт устранения налипания материала заготовки на инструмент являются актуальными.

**Объект исследования** – технологическая операция вытяжки заготовок из алюминиевого сплава АД1.

**Предмет исследования** – взаимодействие инструмента и заготовки при изготовлении вытяжкой деталей из алюминиевых сплавов.

**Целью работы** является повышение качества деталей и увеличение стойкости инструмента при вытяжке листовых заготовок из алюминиевого сплава АД1 путём устранения налипания материала заготовки на инструмент.

В работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Провести анализ способов устранения налипания заготовки на инструмент при обработке металлов давлением. Определить требования к штампируемым деталям, инструменту и исходной заготовке и основные факторы влияющие на налипание заготовки на инструмент.
2. Провести теоретическое исследование процесса налипания при вытяжке и на его основе разработать научно-обоснованную математическую модель взаимодействия заготовки и инструмента.
3. Провести экспериментальные исследования процесса вытяжки деталей из алюминиевого сплава АД1, направленные на проверку адекватности разработанной математической модели и предложенных способов устранения налипания.
4. На основе математической модели разработать методику расчёта технологических параметров процесса вытяжки, обеспечивающих отсутствие налипания заготовки на инструмент и практические рекомендации по обработке поверхности штамповочного инструмента для вытяжки без налипания.
5. Используя разработанную методику расчёта технологических параметров разработать технологию изготовления элементов плавучего pontona из алюминиевого сплава АД1.

**Научной новизной** работы является математическая модель взаимодействия заготовки и инструмента при вытяжке, разработанная на основе решения полной системы уравнений теории пластического течения Леви-Мизеса, которая связывает между собой параметры заготовки, инструмента и процесса вытяжки и позволяет:

- рассчитать удельную деформирующую силу, относительную деформацию и температуру нагрева микронеровностей;
- определить оптимальные параметры деформирования и промежуточного слоя между заготовкой и инструментом обеспечивающие устранение налипания.

**Практической значимостью** работы является:

1. Научно обоснованная методика расчёта технологических параметров процесса вытяжки деталей из алюминиевого сплава АД1.
2. Практические рекомендации по подготовке поверхности инструмента для вытяжки деталей из алюминиевого сплава АД1.

Результаты работы приняты к внедрению на ЗАО НПК «Взрывобезопасность» по результатам промышленного опробования на участке штамповочного производства ООО «Антенна XXI».

**Достоверность результатов.**

Достоверность научных положений, формул, выводов, и рекомендаций работы подтверждаются тем, что:

1. Теоретические исследования были выполнены с использованием известных положений теории пластичности.
2. Экспериментальные данные получены на поверенных установках:

весы Acculab ALC-210d4, дата поверки 25.06.08 (поверитель ФГУП «ВНИМС»); универсальная гидравлическая машина для статических испытаний «Instron», модель серии DX, свидетельство о поверке № СП0297256 от 16.10.2013 (поверитель ФБУ «Ростест-Москва»); преобразователь термоэлектрический ДТПК011-0,5/1,5 (поверен 17.06.2016, поверитель ООО «ОВЕН»), микропроцессорный измеритель TPM200 (поверен 10.06.2016, поверитель ООО «ОВЕН»); испытательная машина на сжатие ИПЭ-1000 (тензопреобразователь Д25-1, № 710063, принят ЗАО «ОРЛЭКС» ОТК-882; датчик перемещения ДПТ-250, №269, принят ОАО «СКБИМ»).

3. Расхождение полученных теоретических результатов, с результатами экспериментальных исследований составляет не более 15%.

**Методы исследования.** Теоретические методы исследования базировались на:

- определении параметров напряженного состояния материала выполненного с помощью полной системы классических уравнений теории пластического течения Леви-Мизеса;
- анализе взаимодействия инструмента и заготовки выполненного с использованием основных положений термодинамики, учитывающих особенности процессов обработки металлов давлением.

Экспериментальные исследования были выполнены по известным методикам определения массы, времени, температуры, деформирующей силы, коэффициента трения. Экспериментальные данные проанализированы с использованием методов математической статистики и являются полностью достоверными с вероятностью 0,997.

**Основные положения**, выносимые на защиту:

1. Научно-обоснованную математическую модель взаимодействия заготовки и инструмента.
2. Методику расчёта технологических параметров процесса вытяжки обеспечивающих отсутствие налипания заготовки на инструмент.
3. Практические рекомендации по подготовке поверхности инструмента для вытяжки деталей из алюминиевого сплава АД1.

**Личный вклад автора** состоит в:

1. Подготовке и анализе сведений об исследованиях в области налипания заготовки на инструмент при обработке металлов давлением, формулировке цели и задач работы.
2. Разработке математической модели взаимодействия поверхностей заготовки и инструмента.
3. Разработке оснастки для проведения экспериментальных исследований по определению адекватности разработанной математической модели.
4. Разработке методики расчёта параметров технологического процесса вытяжки деталей из алюминиевого сплава АД1;
5. Разработке технологических рекомендаций по обработке штамповочного инструмента.

**Апробация работы.** Результаты исследований докладывались и обсуждались на:

1. Международной научно-практической конференции «Трибологические основы повышения ресурса машин (наука, образование, практика)» (Москва, 2011 г.);
2. Международной молодежной школе «Инновационные технологии и передовые инженерные решения» (Орехово-Зуево, 2012 г.);
3. Международной научно-технической конференции «Инноватика в технологии конструкционных материалов» (Москва, 2014 г.);
4. Восьмой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2015 г.);
5. Международной научно-технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем – МБМС-2016» (Севастополь, 2016 г.);
6. Девятой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2016 г.);
7. XI Международной научно-технической конференции «ТРИБОЛОГИЯ – МАШИНОСТРОЕНИЮ» (Москва, 2016 г.).

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в 10 научных работах, общим объёмом 2,37 п. л., (4 статьи выполнены самостоятельно и 6 статей в соавторстве), опубликованных в изданиях, входящих в рекомендованный Перечень ВАК РФ.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 128 наименований. Работа содержит 135 страниц машинописного текста, 33 рисунка, 11 таблиц.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована её цель, раскрыты научная новизна и практическая ценность, а также перечислены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведено теоретическое исследование процесса налипания при вытяжке и на его основе была разработана научно-обоснованную математическую модель взаимодействия заготовки и инструмента. Приведен чертёж заготовки элемента плавучего pontona (Рис. 1.).

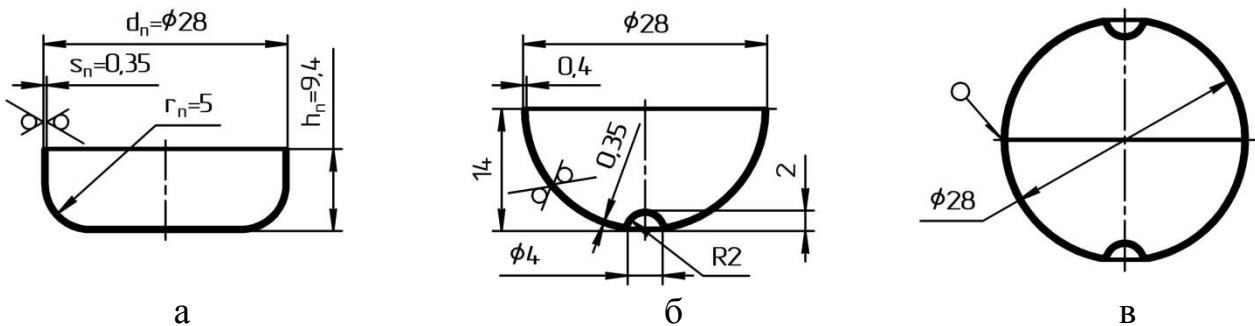


Рис. 1.

а – заготовка элемента плавучего pontona ; б – заготовка элемента плавучего pontona после обжима и формовки; в – элемент плавучего pontona.

На Рис. 2. обозначены:  $d_n$  – диаметр;  $h_n$  – высота;  $s_n$  – толщина;  $r_n$  – радиус элемента плавучего pontoна.

Технологический процесс его изготовления, должен обеспечить: толщину края полусфера равную 0,4мм, при толщине исходной заготовки 0,35мм; минимальное число переходов; высокую производительность, составляющую не менее 20000 заготовок элементов плавучих pontoнов в час.

Существующие технологические процессы изготовления таких деталей, включающие операции вырубки, вытяжки и последующей обрезки фланца не обеспечивают выполнение всех требований к изготавливаемой детали. Также при выполнении операции вытяжки заготовки из алюминиевого сплава АД1, происходит налипание материала заготовки на инструмент, за счёт чего снижается качество изготавливаемых изделий и уменьшается стойкость штампового инструмента. Это оказывает негативное влияние на весь технологический процесс: необходимо останавливать технологическую линию через каждые 60000 изготовленных деталей и производить замену инструмента. При этом минимальная партия составляет 400000 штук.

Анализ способов устранения налипания заготовки на инструмент, показал, что наиболее часто сталкиваются с проблемой налипания алюминиевых и титановых сплавов, а также других материалов. Налипание заготовки на инструмент возникает при вытяжке, прокатке, волочении, прессовании и других процессах.

Установлено, что существующие методики не дают полного описания взаимодействия в системе заготовка-инструмент при вытяжке, в частности не дают объяснения явлению налипания, которое сопровождает вытяжку заготовок из алюминиевых сплавов, а применяемые способы позволяют устранить налипание только в конкретном рассматриваемом случае, это подтверждает актуальность работы.

На основании проведённого литературного обзора сформулированы задачи работы.

**Вторая глава** посвящена теоретическому исследованию процесса взаимодействия заготовки и инструмента при вытяжке с прижимом. В силу отсутствия достоверных данных о контактном взаимодействии заготовки и инструмента, была предложена модель налипания учитывающая, что часть энергии, при деформировании заготовки затрачивается на взаимодействие микронеровностей заготовки и инструмента (Рис. 2.).

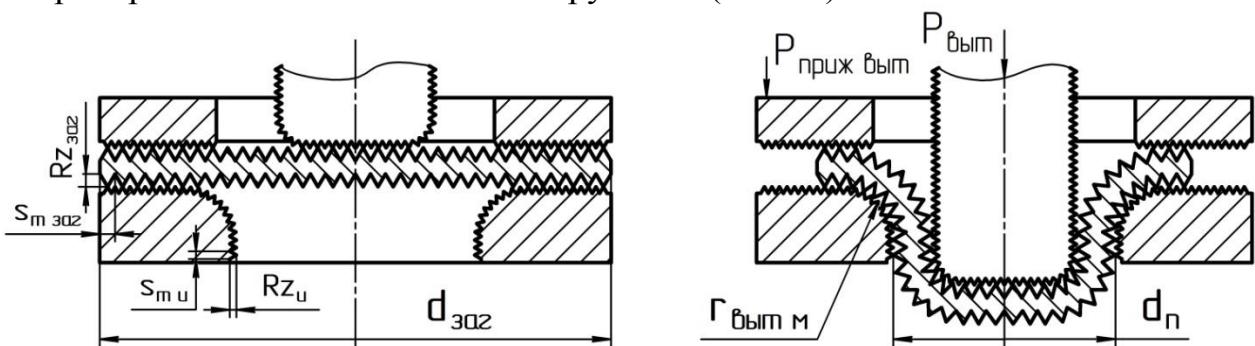


Рис. 2.  
Расчётная схема вытяжки.

На Рис. 2. обозначены:  $P_{\text{выт}}$  – деформирующая сила при вытяжке;  $P_{\text{приж}}$  – сила прижима заготовки при вытяжке;  $d_{\text{заг}}$  – диаметр заготовки;  $r_{\text{выт м}}$  – радиус скругления матрицы;  $Rz_i$  ( $Rz_{\text{заг}}$ ) – средняя высота микронеровностей инструмента (заготовки);  $S_m$  ( $S_{m \text{ заг}}$ ) – средний шаг микронеровностей инструмента (заготовки).

При взаимодействии микронеровности заготовки нагреваются, поскольку часть энергии, затрачиваемой на их взаимодействие (в данной работе принято 100%) переходит в тепло. Выдвинута гипотеза, что, нагрев микронеровности заготовки создаёт условия для возникновения налипания заготовки на инструмент. Из предложенной гипотезы можно вывести два следствия, что устранение налипания можно достичь:

1 – уменьшением температуры нагрева микронеровности заготовки путём выбора оптимальной скорости вытяжки;

2 – увеличением теплоотдачи с поверхности микронеровности заготовки путём заполнения пространства между микронеровностями инструмента материалом, обладающим требуемым коэффициентом теплопроводности.

Согласно выдвинутой гипотезе условие возникновения налипания заготовки на инструмент при вытяжке деталей из алюминиевых сплавов записывается следующим образом:

$$t^{\circ} \geq 0,5t_{\text{пл заг}}^{\circ} \quad (1)$$

$t_{\text{пл заг}}^{\circ}$  – температура плавления материала заготовки.

$t^{\circ}$  – конечная температура микронеровности.  $t^{\circ} = \Delta t^{\circ} + 20^{\circ}\text{C}$ , где:

$20^{\circ}\text{C}$  – стандартная комнатная температура.

$\Delta t^{\circ}$  – локальное повышение температуры микронеровности, рассчитывается по формуле предложенной Воронцовым А.Л:  $\Delta t^{\circ} = qs_1/c\rho h_y$ , где:

$c$  (Дж/кгК) – удельная теплоёмкость материала микронеровности;

$\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) – плотность материала микронеровности;

$s_1$  (мкм) – абсолютная деформация микронеровности (Рис. 3.);

$h_y$  (мкм) – высота очага пластической деформации микронеровности, принималась равной:  $h_y = 0,2s_1$  (Рис. 3.).

$q$  (МПа) – удельная деформирующая сила, действующая на микронеровность;

Для расчёта удельной деформирующей силы микронеровности инструмента и заготовки принята расчётная схема деформирования микронеровности в виде усеченного конуса (Рис. 3.).

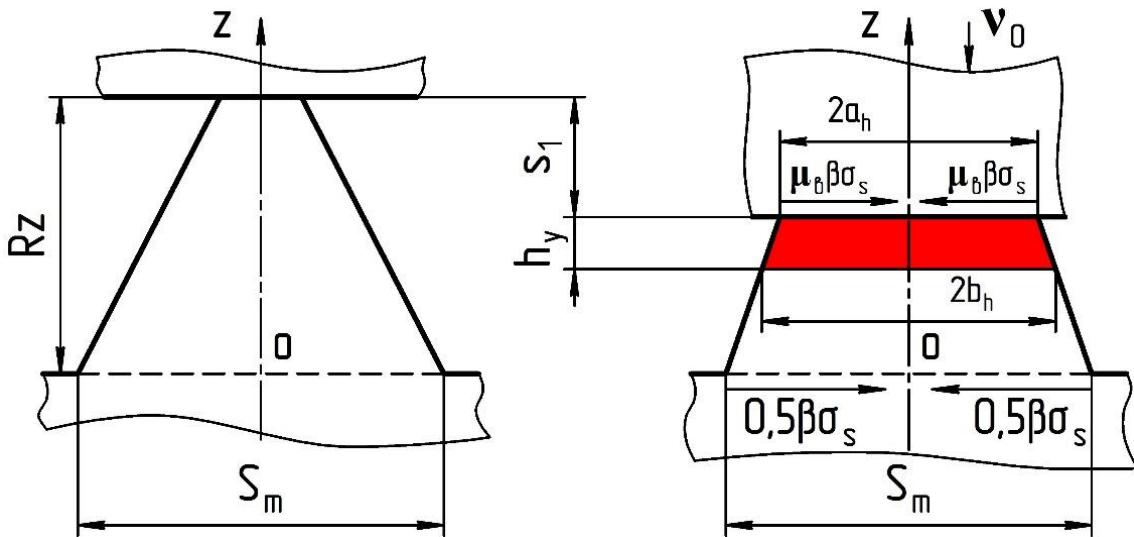


Рис. 3.

Деформация микронеровности.

На Рис. 3. обозначены:  $v_0$  – начальная скорость осадки образца;  $Rz$  – начальная высота микронеровности;  $S_m$  – диаметр основания микронеровности;  $\beta$  – коэффициент Лоде;  $\sigma_s$  – напряжение текучести;  $\mu_b$  – коэффициент трения на торце вершины образца;  $a_h$  – радиус вершины нагретой части микронеровности:  $a_h = \frac{s_m}{2} \left( \sqrt{\frac{4Rz}{Rz-s_1}} - 3 - 1 \right)$ ;  $b_h$  – радиус основания нагретой части микронеровности:  $b_h = \left[ \frac{s_m}{2} h_y + a_h(Rz - s_1) - a_h h_y \right] / (Rz - s_1)$ .

Условия контакта на верхнем и нижнем торце микронеровности различны. При решении задачи была принята цилиндрическая система координат, с началом в точке «О» и осью «Z» направленной вертикально вверх.

Поставленная задача решалась по методу предложенному Воронцовым А.Л., заключающемуся в решении системы из 12 уравнений, в которые входят 12 неизвестных величин – нормальные напряжения:  $\sigma_\rho$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ ; касательное напряжение:  $\tau_{\rho z}$ ; среднее нормальное напряжение (гидростатическое давление):  $\sigma$ ; скорости линейных деформаций:  $\xi_\rho$ ,  $\xi_\theta$ ,  $\xi_z$ ; скорость угловой деформации:  $\eta_{\rho z}$ ; интенсивность скоростей деформаций:  $\xi_i$ ; скорости перемещения материальных точек среды (скорости течения)  $v_\rho$ ,  $v_z$ . В результате решения были получены формулы, определяющие все перечисленные величины.

Это позволило вывести формулу (3) для определения удельной деформирующей силы действующей на микронеровность.

$$q = \sigma_s + \frac{\sigma_s s_1 s_m}{16 Rz^2} \left( \frac{s_1 + 2\mu_b Rz}{Rz - s_1} \right) \quad (2)$$

Абсолютная деформация микронеровности  $s_1$  рассчитывается по формуле (3):

$$s_1 = Rz - 4Rz / \left[ \left( 1 + \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{2P_{\text{выт}}}{\sigma_s d_{\text{п}} r_{\text{выт м}}}} \right)^2 + 3 \right] \quad (3)$$

Деформирующая сила при вытяжке  $P_{\text{выт}}$  рассчитывается по формуле (15). Таким образом, конечная температура микронеровности составит:

$$t^\circ = \frac{\sigma_s s_1}{c \rho h_y} \left[ 1 + \frac{s_1 s_m}{16 Rz^2} \left( \frac{s_1 + 2\mu_b Rz}{Rz - s_1} \right) \right] + 20^\circ\text{C} \quad (4)$$

Расчёт по формуле (4) для вытяжки заготовки элемента плавучего понтона показывает, что температура нагрева микронеровности заготовки составляет  $328,5^\circ\text{C}$  ( $Rz_{\text{заг}} = 6,3\text{мкм}$ ;  $s_{m\text{ заг}} = 31,5\text{мкм}$ ;  $\mu_b = 0,1$ ;  $\rho_{\text{заг}} = 2750\text{кг/м}^3$ ;  $c_{\text{заг}} = 903\text{Дж/кгК}$ ), а температура нагрева микронеровности инструмента составляет  $1266^\circ\text{C}$  ( $Rz_i = 2,5\text{мкм}$ ;  $s_{m\text{ и}} = 12,5\text{мкм}$ ;  $\mu_b = 0,1$ ;  $\rho_i = 7850\text{кг/м}^3$ ;  $c_i = 462\text{Дж/кгК}$ ).

Таким образом, температура нагрева микронеровности инструмента ( $1266^\circ\text{C}$ ) превышает температуру плавления материала микронеровности заготовки ( $660^\circ\text{C}$ ), условие (1) выполняется, налипание заготовки на инструмент будет происходить.

Согласно первому следствию из предложенной гипотезы, чтобы устранить налипание необходимо обеспечить отвод выделившейся теплоты от микронеровностей заготовки. Это можно осуществить путём выбора оптимальной скорости вытяжки, или увеличения теплоотдачи с поверхности микронеровности. Оптимальная скорость вытяжки должна удовлетворять следующему условию:

$$V_{\text{опт}} \leq V_{\text{макс}} \quad (5)$$

$V_{\text{макс}}$  – максимально допустимая скорость вытяжки, при которой теплота, выделившаяся во время взаимодействия микронеровностей, полностью отводится от микронеровности заготовки за время равное времени их взаимодействия. Принимая, что скорость вытяжки равна скорости деформирования микронеровности  $V_{\text{макс}} = s_1/\tau$ , где:

$\tau$  – время взаимодействия микронеровностей, при котором накопленная теплота, полностью передаётся среде окружающей микронеровности:

$$\tau = Q_c/N_t, \text{ где:}$$

$Q_c$  – теплота, накопленная микронеровностью инструмента:

$$Q_c = \frac{1}{3} \pi c \rho \Delta t^\circ (a_h^2 + a_h b_h + b_h^2);$$

$N_t$  – мощность теплоотдачи с поверхности микронеровности инструмента:

$$N_t = \frac{\pi \Delta t^\circ}{Rz_{\text{инстр}}} \left[ \lambda_{\text{заг}} b_h^2 + \lambda_{\text{инстр}} a_h^2 + \lambda_{\text{окр}} (a_h + b_h) \sqrt{h_y^2 + (b_h - a_h)^2} \right]$$

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала:  $\lambda_{\text{заг}}$  – заготовки;  $\lambda_{\text{инстр}}$  – инструмента, заготовки  $\lambda_{\text{окр}}$  – среды окружающей микронеровности заготовки;

Таким образом, максимально допустимая скорость вытяжки составит:

$$V_{\text{макс}} = \frac{3s_1 [\lambda_{\text{заг}} b_h^2 + \lambda_{\text{инстр}} a_h^2 + \lambda_{\text{окр}} (a_h + b_h) \sqrt{h_y^2 + (b_h - a_h)^2}]}{Rz_{\text{инстр}} c \rho (a_h^2 + a_h b_h + b_h^2)} \quad (6)$$

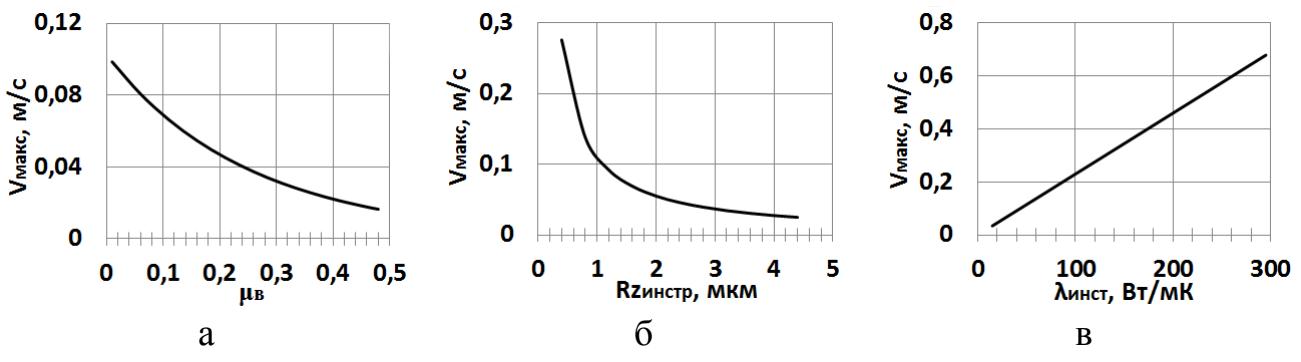


Рис. 4.

Графические зависимости максимальной скорости деформирования при:

а –  $Rz_{инстр} = 1,6 \text{ мкм}$ ,  $\lambda = 30 \text{ Вт/мК}$ ; б –  $\mu_B = 0,1$ ,  $\lambda = 30 \text{ Вт/мК}$ ;

в –  $Rz_{инстр} = 1,6 \text{ мкм}$ ,  $\mu_B = 0,1$

На Рис. 4 представлены графические зависимости максимально допустимой скорости вытяжки, рассчитанные для следующих условий:  $d_{\text{п}} = 28 \text{ мм}$ ;  $h_{\text{п}} = 9,4 \text{ мм}$ ;  $s_{\text{п}} = 0,35 \text{ мм}$ ;  $r_{\text{п}} = 5 \text{ мм}$ ;  $s_{\text{минстр}} = 5Rz_{\text{инстр}}$ ;  $c_{\text{инстр}} = 452 \text{ Дж/кгК}$ ;  $\rho_{\text{инстр}} = 7850 \text{ кг/м}^3$ ;  $Rz_{\text{заг}} = 6,3 \text{ мкм}$ ;  $s_{\text{заг}} = 31,5 \text{ мкм}$ ;  $c_{\text{заг}} = 903 \text{ Дж/кгК}$ ;  $\rho_{\text{заг}} = 2750 \text{ кг/м}^3$ . Варьируемые параметры:  $Rz_{\text{и}} = 0,4 \dots 4 \text{ мкм}$ ;  $\mu_{\text{в}} = 0,02 \dots 0,48$ ;  $\lambda = 15 \dots 300 \text{ Вт/мК}$ .

В случае если условие (5) не выполняется (например, при рассчитанной максимальной скорости невозможно обеспечить требуемую производительность), согласно второму следствию выдвинутой гипотезы следует увеличить теплоотдачу с поверхностей микронеровности. Наиболее эффективным решением является теплоотдача с вершины микронеровности, контактирующей с поверхностью инструмента. Для этого необходимо заполнить пространство между микронеровностями инструмента материалом, обеспечивающим отвод количества теплоты, выделившейся при взаимодействии микронеровностей за время, равное или меньшее времени их взаимодействия.

Минимальную величину такого коэффициента теплопроводности ( $\lambda_{\text{мин}} = \lambda_{\text{инстр}}$ ) можно вычислить исходя из времени взаимодействия микронеровностей:  $\tau = s_{1\text{и}}/Wh_{\text{пп}}$ , где  $W$  (1/ч) – частота рабочего хода пресса, а  $h_{\text{пп}}$  (мм) – величина хода ползуна пресса.

Минимальный коэффициент теплопроводности материала среды окружающей микронеровность инструмента  $\lambda_{\text{мин}}$  вычисляется по формуле (7):

$$\lambda_{\text{мин}} = \frac{c\rho Rz_{\text{инстр}}(a_h^2 + a_h b_h + b_h^2)Wh_{\text{пп}}}{3s_1 a_h^2} - \frac{[\lambda_{\text{заг}} b_h^2 + \lambda_{\text{окр}}(a_h + b_h)\sqrt{h_y^2 + (b_h - a_h)^2}]}{a_h^2} \quad (7)$$

Рекомендуемая величина коэффициента теплопроводности среды, окружающей микронеровность инструмента  $\lambda_{\text{рек}}$  выбирается по (8):

$$\lambda_{\text{рек}} \geq \lambda_{\text{мин}} \quad (8)$$

После выбора рекомендуемой величины коэффициента теплопроводности среды, окружающей микронеровность, необходимо повторить расчёт максимально допустимой скорости вытяжки (6), с заменой  $\lambda_{\text{инстр}}$  на  $\lambda_{\text{рек}}$ .

В случае если  $\lambda_{\text{рек}} < 30 \text{ Вт/мК}$  для отвода теплоты рекомендуется использование покрытия полученного методом финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО). Покрытие состоит из меди или медных сплавов, толщина покрытия соизмерима с размерами микронеровностей заготовки, таким образом можно принять, что  $\lambda_{\text{инстр}} > 100 \text{ Вт/мК}$ , в случае нанесения покрытия методом ФАБО.

**В третьей главе** изложены результаты экспериментальной проверки гипотезы, представленной в главе 2.

Для проверки теоретических формул расчёта удельной деформирующей силы (2) и конечной температуры микронеровности (4) был проведен эксперимент по высадке конических образцов высотой 30 мм, диаметром основания 30 мм, изготовленных из алюминиевого сплава АД1 ГОСТ 4784-97. Шероховатость поверхностей образцов  $R_a 6,3$ . В ходе эксперимента варьировалась скорость осадки (0,5мм/с и 0,13мм/с) и теплопроводность материала, контактирующего с вершиной микронеровности (сталь ( $\lambda=30 \text{ Вт/мК}$ ) и термопаста ( $\lambda=100 \text{ Вт/мК}$ )). Высадка проводилась на машине для испытания на сжатие ИПэ-1000. Величина относительной деформации образцов составляла 30%. Коэффициент трения между инструментом и заготовкой на основании литературных данных был принят равным 0,1. Температура образцов при высадке измерялась в центре образца с использованием преобразователя термоэлектрического ДТПК011-0,5/1,5, подключенного к микропроцессорному измерителю TPM200 (Рис. 5.).

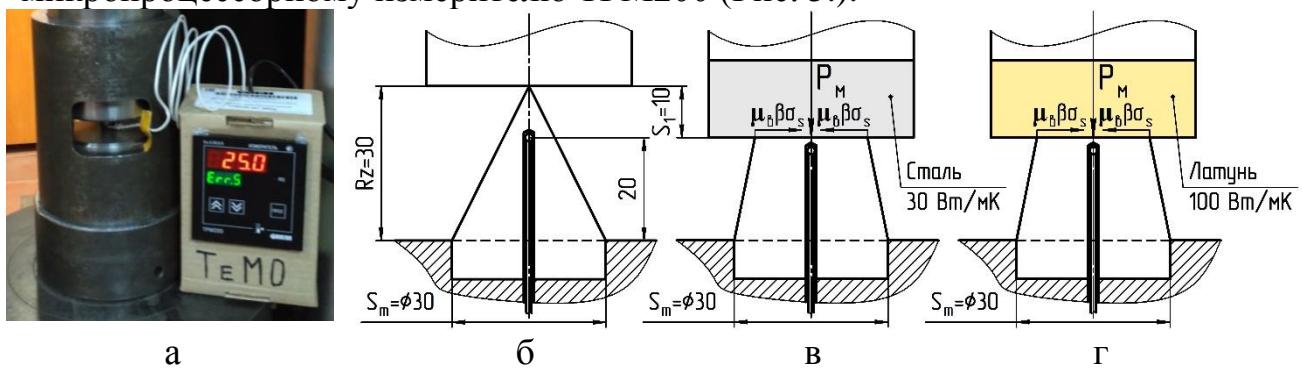


Рис. 5.

Измерение температуры образцов при высадке. а – общий вид оборудования для измерения температуры; б – образец до высадки; в – высадка образца с теплопроводностью у вершины микронеровности  $30 \text{ Вт/мК}$ ; г – высадка образца с теплопроводностью у вершины микронеровности  $100 \text{ Вт/мК}$ .

Экспериментально определённая величина удельной деформирующей силы составила  $q_{\text{эксп}} = 709,4 \text{ МПа}$ . Теоретический расчёт величины удельной деформирующей силы по формуле (2) составил  $q_{\text{теор}} = 726 \text{ МПа}$ . Погрешность

расчёта по формуле (2) составила 2,4%. Результаты эксперимента по измерению температуры, представлены в Таблице 1.

Таблица 1.  
Результаты эксперимента по измерению температуры

Условия контакта образцов	Скорость высадки образцов					
	V=0,5мм/с			V=1,3мм/с		
	Данные	T-ра, °C	Погр.	Данные	T-ра, °C	Погр.
Сталь $\lambda=30\text{Вт/мК}$	Эксп.	42,3	12,1%	Эксп.	71,4	9,1%
	Теор.	47,4		Теор.	77,9	
Латунь $\lambda=100\text{Вт/мК}$	Эксп.	31,4	7,9%	Эксп.	52,8	9,2%
	Теор.	33,9		Теор.	57,7	

Для расчёта величины деформирующей силы, необходимой для определения абсолютной деформации  $s_1$  по формуле (3) с использованием метода многофакторного планирования эксперимента была составлена матрица плана эксперимента  $3^2/9$ . При этом варьировали два фактора: коэффициент трения между заготовкой и инструментом  $\mu_e$  и силой прижима заготовки к инструменту  $P_{приж}$  по 3м уровням ( $\mu_e \in (0,056; 0,129; 0,193)$ ;  $P_{приж} \in (100H; 275H; 450H)$ ).

Для измерения экспериментальных значений деформирующей силы при вытяжке использовали универсальную гидравлическую машину для статических испытаний «Instron», модель серии DX.

Коэффициент трения определяли экспериментально по методике хорасчетного творческого центра Уфимского авиационного института.

Коэффициент трения  $\mu_e = 0,056$  обеспечивали за счёт нанесения покрытия ФАБО и использования металлоплакирующего смазочного материала; а коэффициент трения  $\mu_e = 0,129$  обеспечивали за счёт смазочного материала на основе дисульфида молибдена;  $\mu_e = 0,193$  - за счёт использования в качестве смазочного материала индустриального масла И40А.

В итоге было построено уравнение регрессии в натуральном масштабе, позволяющее определить силу деформирования при вытяжке в зависимости от коэффициента трения и силы прижима:

$$P_{вым} = 1493,5 + 3047,31\mu_e + 0,632P_{приж} \quad (9)$$

Далее полученную формулу (9) использовали при расчёте абсолютной деформации микронеровности  $s_1$  (3).

Для увеличения количества отводимой теплоты от микронеровностей на штамповый инструмент может быть нанесено покрытие методом ФАБО. При такой обработке происходит заполнение пространства между микронеровностями медным сплавом (Рис. 6.).

Стабильность нанесения покрытия методом ФАБО оценивалась по величине дисперсии массы нанесённого слоя материала на образце. Для экспериментальной проверки в качестве наносимых материалов были выбраны три марки: М3 ГОСТ 859-2014, ЛС59-1 ГОСТ 15527-2004 и БрХ1 ГОСТ 18175-

78. Материал образца: сталь 20 ГОСТ1050-88. Масса нанесенного слоя материала определялась как разница между массой образца до и после нанесения материала. Взвешивание проводилось на весах Acculab ALC-210d4 с точностью 0,001г.

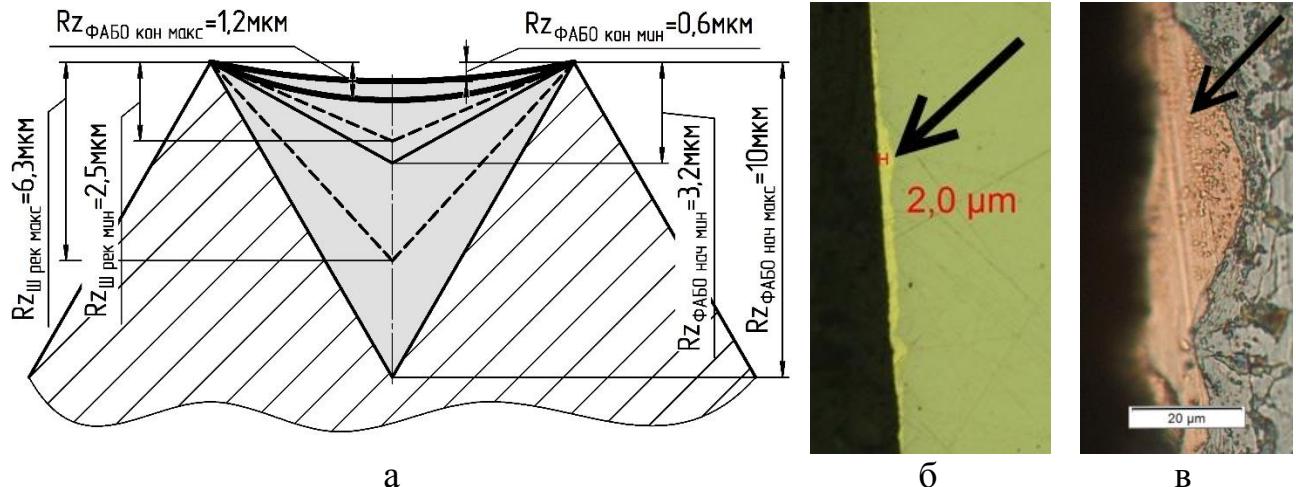


Рис. 6.

а – схема заполнения пространства между микронеровностями при нанесении покрытия ФАБО; б, в – поперечный срез покрытия. Стрелками показано заполнение пространства между микронеровностями медным сплавом ЛС59-1.

После измерения массы нанесённого материала рассчитывались: среднее арифметическое ( $\bar{a}$ ) и среднее квадратическое отклонение ( $\sigma$ ), дисперсия ( $\sigma^2$ ). Результаты эксперимента представлены в Таблице 2.

Таблица 2.

Результаты эксперимента по исследованию стабильности нанесения покрытия методом ФАБО

№	Число экс-тов, n, шт	Материал покрытия	Среднее арифметическое отклонение, $\bar{a}$ , г	Среднее квадратическое отклонение, $\sigma$ , г	Дисперсия, $\sigma^2$ , г <sup>2</sup>
1	12	ЛС59-1	1,72	0,53	0,28
2	12	М3	1,6	0,93	0,85
3	12	БрХ1	2,3	1,42	2,02

Доверительный интервал ( $3\sigma$ ) для материала покрытия ЛС59-1 с вероятностью  $P=0,997$  не выходит в отрицательную область масс (т.е. на 1000 обработанных штампов методом ФАБО бракованными могут оказаться не более 3х штук). Таким образом, покрытие, полученное методом ФАБО из материала ЛС59-1, обладает наилучшей стабильностью нанесения и может быть использовано для обработки штамповочного инструмента.

Для проверки предложенного технологического решения было проведено испытание на машине трения. Скорость относительного перемещения образцов составляла 0,22м/с, давление на контакте 52,5 МПа, материал инструмента: Х12,  $Rz_{инстр} = 1,6\text{мкм}$ ; материал заготовки: АД1,  $Rz_{заг} = 6,3\text{мкм}$ . На Рис. 7.

показано состояние поверхности модели инструмента и заготовки после экспериментальной проверки. Время до начала налипания заготовки на инструмент в случае обработки методом ФАБО увеличивается в 2-4 раза. Контроль возникновения налипания осуществлялся органолептическим методом.

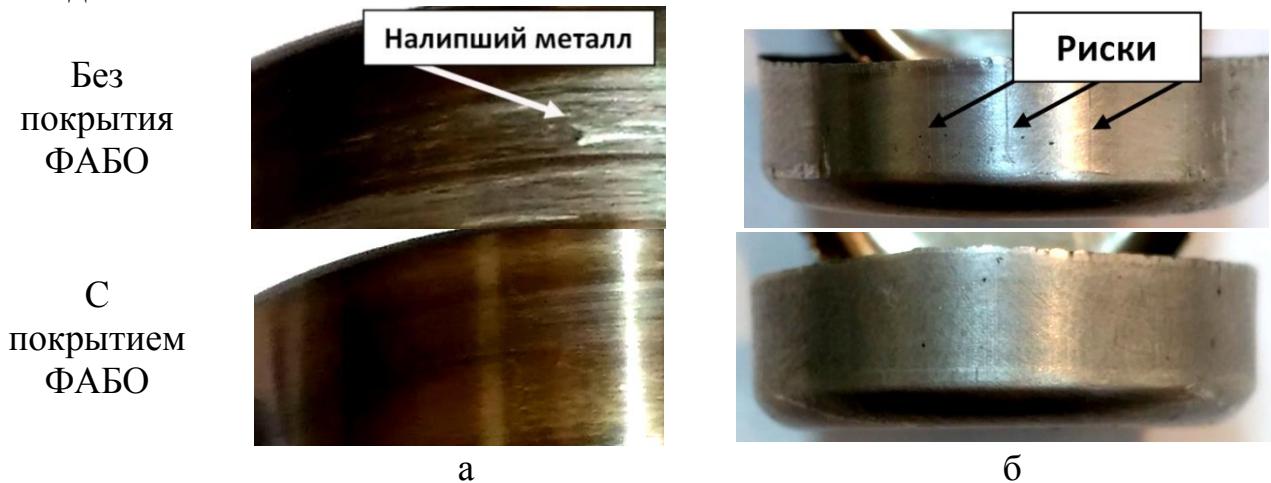


Рис. 7.

Состояние поверхности. а – модели инструмента при испытании на машине трения; б – изготовленной детали.

**В четвёртой главе** представлена методика расчёта технологических параметров процесса вытяжки обеспечивающих отсутствие налипания заготовки на инструмент. Методика расчёта представлена в Таблице 3.

Таблица 3.

Методика расчёта технологических параметров процесса вытяжки, в случае налипания заготовки на инструмент

№	Формула расчёта
1	Исходные данные для расчёта: $d_{\text{п}}; h_{\text{п}}; s_{\text{п}}; r_{\text{п}}; \mu_{\text{в}}; \lambda_{\text{окр}}; h_{\text{пп}}; n; \tau_{\text{общ}};$ $Rz_{\text{инстр}}; s_{\text{тинстр}}; c_{\text{и}}; \rho_{\text{инстр}}; \lambda_{\text{инстр}}$ $Rz_{\text{заг}}; s_{\text{т заг}}; c_{\text{заг}}; \rho_{\text{заг}}; \sigma_s_{\text{заг}} = f(\varepsilon_{\text{заг}}); t_{\text{пл заг}}, \lambda_{\text{заг}}$
2	Расчёт силы прижима: $P_{\text{приж}} = F_{\text{приж}} q_{\text{приж}}$
3	Расчёт деформирующей силы при вытяжке: $P_{\text{выт}} = 1493,5 + 3047,31 \mu_{\text{в}} + 0,632 P_{\text{приж}}$
4	Максимально допустимая скорость вытяжки, при которой не возникает налипание заготовки на инструмент: $V_{\text{макс}} = \frac{3s_1 [\lambda_{\text{заг}} b_h^2 + \lambda_{\text{инстр}} a_h^2 + \lambda_{\text{окр}} (a_h + b_h) \sqrt{h_y^2 + (b_h - a_h)^2}]}{Rz_{\text{инстр}} c \rho (a_h^2 + a_h b_h + b_h^2)}$
5	Проверка выполнения условия: $V_{\text{опт}} \leq V_{\text{макс}}$

Таблица 3 (продолжение)

6	Минимальный коэффициент теплопроводности материала среды окружающей микронеровность:
	$\lambda_{\min} = \frac{c\rho R z_{\text{инстр}} (a_h^2 + a_h b_h + b_h^2) W h_{\text{пп}}}{3s_1 a_h^2} - \frac{[\lambda_{\text{заг}} b_h^2 + \lambda_{\text{окр}} (a_h + b_h) \sqrt{h_y^2 + (b_h - a_h)^2}]}{a_h^2}$
7	Выбор шероховатости поверхности инструмента и вида его обработки: 1. $\lambda_{\min} > 30 \text{ Вт/мК}$ , то $3,2 \text{ мкм} \leq Rz_i \leq 10 \text{ мкм}$ , с ФАБО 2. $\lambda_{\min} \leq 30 \text{ Вт/мК}$ , то $0,08 \text{ мкм} \leq Rz_i \leq 2,5 \text{ мкм}$ , без ФАБО
8	Рекомендуемая величина коэффициента теплопроводности среды, окружающей микронеровность: $\lambda_{\text{рек}} \geq \lambda_{\min}$
9	Рекомендуемый коэффициент трения: $0,05 \leq \mu_e \leq 0,1$
10	Уточненный расчёт максимально допустимой скорости вытяжки: $V_{\max} = \frac{3s_1 [\lambda_{\text{заг}} b_h^2 + \lambda_{\text{рек}} a_h^2 + \lambda_{\text{окр}} (a_h + b_h) \sqrt{h_y^2 + (b_h - a_h)^2}]}{R z_{\text{инстр}} c \rho (a_h^2 + a_h b_h + b_h^2)}$

Разработаны практические рекомендации по подготовке поверхности инструмента для вытяжки заготовок из алюминиевого сплава АД1 без налипания. Для реализации практических рекомендаций разработано устройство для нанесения покрытия методом ФАБО на поверхность штамповочного инструмента, представленное на Рис. 8.

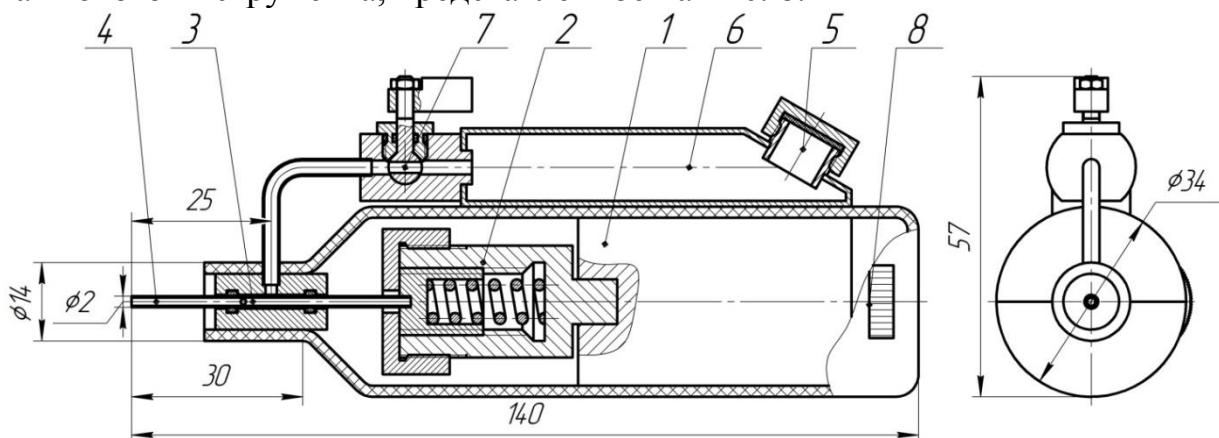


Рис. 8.

Устройство для заполнения пространства между микронеровностями методом ФАБО. 1 – электродвигатель; 2 – шпиндель; 3 – плавающая опора; 4 – инструмент; 5 – заливная горловина; 6 – емкость для технологической среды; 7 – вентиль; 8 – регулятор скорости.

В пятой главе представлен усовершенствованный технологический процесс изготовления заготовок элементов плавучего понтона, обеспечивающий повышение стойкости инструмента и улучшение качества изготавливаемых деталей за счёт устранения налипания.

Технологический процесс был апробирован в условиях промышленного производства на предприятии ООО «Антенна XXI». Результаты работы приняты к внедрению для производственного участка ЗАО «Научно-производственная компания «Взрывобезопасность».

По результатам работы получен патент на полезную модель RU 153828 U1 «Штамп для изготовления тонкостенных куполообразных днищ».

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ способов устранения налипания заготовки на инструмент показал, что существующие способы решают проблему налипания только в конкретном рассматриваемом случае, без возможности решения проблемы налипания в отличных от рассматриваемого случая условий.
2. Теоретическое исследование процесса налипания при вытяжке, выполненное путём решения полной системы классических уравнений теории пластического течения Леви-Мизеса для расчета величины удельной деформирующей силы, позволило определить формулу расчёта относительной деформации микронеровностей, что сделало возможным разработать научно-обоснованную математическую модель взаимодействия заготовки и инструмента. Согласно разработанной математической модели устранить налипание можно путём:
  - а) выбора оптимальной скорости деформирования заготовки;
  - б) выбора коэффициента теплопроводности среды контактирующей с поверхностью микронеровностей заготовки.
3. Экспериментально доказано, что при штамповке элементов плавучих pontонов эффективно отводящим тепло и имеющим высокую стабильность нанесения является покрытие из латуни ЛС59-1, нанесённое на поверхности инструмента, контактирующие с заготовкой, методом финишной антифрикционной безабразивной обработки. Расхождение теоретических и экспериментальных данных составляет не более 15%.
4. Разработанная методика расчёта технологических параметров вытяжки позволяет обеспечить отсутствие налипания инструмента на заготовку при:
  - максимальной скорости процесса вытяжки до 0,23 м/с;
  - шероховатости инструмента от  $Rz_{инстр} = 3,2$  мкм;
  - нанесении покрытия на поверхность инструмента методом ФАБО из материала ЛС59-1;
  - использовании смазочных материалов, обеспечивающих коэффициент трения до 0,1.
5. Эффективность полученных результатов подтверждена их успешным промышленным опробованием и включением в общий технологический процесс производства плавучих pontонов из материала АД1 на производственном участке ЗАО «Научно-производственной компании «Взрывобезопасность».

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ**

1. Сережкин М.А. Проблема налипания деформируемой заготовки на инструмент при обработке металлов давлением // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2017. № 2. С. 17-19. (0,231 печ. л.).
2. Сережкин М.А. Расчёт удельной деформирующей силы при осадке заготовок в виде усеченного конуса с различными условиями трения // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2017. № 3. С. 8-12. (0,462 п. л.).
3. Сережкин М.А. Расчёт температуры нагрева микронеровностей вследствие их пластической деформации и способ уменьшения нагрева. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2017. № 4. С. 10-14. (0,462 п. л.).
4. Сережкин М.А. Выбор скорости деформирования в условиях налипания материала заготовки на инструмент при вытяжке с прижимом // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. № 3 (317). С. 137-141. (0,462 п. л.).
5. Сережкин М.А., Ступников В.П., Мельников Э.Л. Определение силы деформирования при вытяжке с прижимом с учётом налипания штампируемого материала на инструмент // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 10. С. 19-23. (0,462 п. л. / 0,154 п. л.).
6. Влияние финишной антифрикционной безабразивной обработки рабочей поверхности штампа на условия трения при вытяжке деталей-полусфер из технически чистого алюминия / Сережкин М.А. [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 5. С. 21-25. (0,462 п. л. / 0,0924 п. л.).
7. Сережкин М.А., Мельников Э.Л. Влияние финишного антифрикционного безабразивного покрытия на усилие формоизменения при вытяжке деталей из сплава АМГ6БМ // Инженерный журнал: наука и инновации. 2015. № 10 (46). С. 4. (0,1155 п. л. / 0,05775 п. л.).
8. Сережкин М.А., Мельников Э.Л. Повышение стойкости вытяжных штампов при изготовлении крупногабаритных днищ // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2014. № 12. С. 7-11. (0,462 п. л. / 0,231 п. л.).
9. Сережкин М.А., Мельников Э.Л. Разработка технологии повышения стойкости крупногабаритных матриц штампов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2014. Т. 2. № 1. С. 214-221. (0,8085 п. л. / 0,40425 п. л.).
10. Сережкин М.А., Мельников Э.Л. Повышение стойкости штамповой оснастки трибологическими методами // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2013. № 12. С. 17-19. (0,3465 п. л. / 0,17325 п. л.).
11. Штамп для изготовления тонкостенных куполообразных днищ: пат. 153828 Рос. Федерации № 2014154113/02; заявл. 30.12.2014; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22.