

Степанов Борис Алексеевич

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ
ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО СОЗДАНИЮ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРЕССОВ С ВРАЩАЮЩИМСЯ
ШТАМПОДЕРЖАТЕЛЕМ**

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва 2013

Работа выполнена в

ФГБОУ ВПО «Московский государственный индустриальный университет»

Официальные оппоненты: Власов Андрей Викторович, доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Кохан Лев Соломонович, доктор технических наук, профессор, Московский государственный вечерний металлургический институт

Колотов Юрий Васильевич, доктор технических наук, Московский государственный технический университет «Станкин»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»

Защита состоится «25» февр 2013 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д212.141.04 в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 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 им. Н. Э. Баумана

Автореферат разослан «14» января 2013 г.

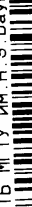
Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат технических наук, доцент



Семёнов В.И.

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важная роль в решении проблемы широкого применения энерго- и материалосберегающих технологий принадлежит обработке металлов давлением как одному из наиболее производительных и экономичных методов изготовления заготовок и деталей. В этой связи требуется непрерывное совершенствование выпускаемого кузнечно-прессового оборудования. Значительный вклад в развитие теорий и конструкций кузнечно-прессового оборудования внесли А.И. Зимин, М.В. Сторожев, Б.В. Розанов, В.М. Синицкий, В.И. Власов, Ю.А. Бочаров, Е.Н. Ланской, Е.Н. Складчиков, А.В. Сафонов и другие ученые.

Необходимость облегчения машиностроительной продукции выдвигает в ряд актуальных задач получения крупногабаритных тонкостенных изделий, обладающих высокими эксплуатационными свойствами. Особое место в номенклатуре поковок занимают осесимметричные поковки типа шестерен, дисков, ступиц, колес и т.д. Однако при изготовлении этого класса поковок встречается ряд технологических трудностей, прежде всего – высокие удельные силы, которые могут быть снижены путем замены традиционных методов штамповки методами комбинированного нагружения.

Для круглых в плане поковок комбинированное нагружение реализуется одновременным воздействием на деформируемый металл осевой силы и крутящего момента. Практически такое нагружение осуществляется вращением инструмента во время формоизменения заготовки, поэтому такой метод деформирования получил название «штамповка осадкой с кручением». В основе его лежат принципиальные, по сравнению со штамповкой поступательно перемещающегося инструментом, отличия в движении деформируемой среды, заключающиеся в изменении механики контактного взаимодействия инструмента и заготовки и возникновении в объеме металла дополнительных сдвиговых деформаций. Штамповка с кручением дает возможность существенно снизить как технологические силы деформирования, так и нормальные напряжения, действующие на инструмент, особенно в центральной зоне. Практическая реализация штамповки с кручением позволяет не только увеличить размеры поковок, штампуемых на тяжелых прессах, но и снизить их вес за счет уменьшения перемычек под прошивку и повысить точность за счет снижения упругих деформаций системы пресс-штамп, увеличить стойкость штампов.

Разработанное в начале 70-х годов при участии автора настоящей работы новое направление в обработке металлов давлением получило определенное развитие в ряде отраслей машиностроения. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны типовые технологические процессы малоотходной точной штамповки с кручением.

Для реализации новой технологии требуется создание принципиального нового кузнечно-штамповочного оборудования – специализированных прессов с вращающимся штамподержателем, которые ни в нашей стране, ни за рубежом не разрабатываются. В связи с этим исследования, направленные на разработку и совершенствование прессов для

штамповки с кручением, являются актуальными и могут быть квалифицированы как вклад в ускорение научно-технического процесса.

Цель работы – расширение области применения в машиностроительном производстве инновационных технологических процессов объемной штамповки тонкостенных осесимметричных деталей из черных, цветных металлов и сплавов, а также пористых материалов путем разработки конструкций, создания методик расчета и промышленного освоения специализированного оборудования с вращающимся штамподержателем.

Для достижения указанной цели поставлены следующие **задачи исследований**.

1. Разработать конструкции специализированных прессов с вращающимся штамподержателем различного технологического назначения.

2. Создать математические модели для расчёта силовых и энергетических параметров специализированного оборудования во взаимосвязи с технологическими параметрами процессов штамповки с кручением осесимметричных поковок различных типоразмеров.

3. Разработать методику оптимизации конструктивных параметров прессов, обеспечивающих их наилучшие экономические показатели.

4. Разработать и исследовать двухмховичный привод винтовых прессов с повышенной энергоёмкостью.

5. Провести комплексные испытания на экспериментальных образцах специализированных прессов для проверки адекватности полученных решений.

6. Внедрить результаты разработок в промышленность.

Методы исследования. Все разделы работы выполнены с единых методологических позиций с использованием основных положений теорий конструирования и оптимизации, теории механизмов и машин с использованием методов структурного моделирования, численно-аналитических методов вычислительной математики и программирования, основ дифференциального исчисления и физических методов моделирования, основ теории физического эксперимента. Экспериментальные исследования выполнены с использованием лабораторной гидравлической прессовой установки для штамповки с кручением со встроенной регистрирующей аппаратурой и специализированных прессов с вращающимся штамподержателем.

Научная новизна работы заключается в:

- научном обосновании взаимосвязи технологических параметров штамповки с кручением и технических характеристик гаммы специализированных прессов с вращающимся штамподержателем;

- создании методики определения оптимальных конструктивных параметров прессов с вращающимся штамподержателем, позволяющей реализовать положительные технологические эффекты штамповки с кручением;

– создании математических моделей работы специализированных прессов во взаимосвязи с технологическими параметрами штамповки с кручением, позволяющие получать кинематические, силовые и энергетические характеристики оборудования, связанные с параметрами технологии;

– получении на основе математического моделирования новых данных по механике взаимодействия заготовки и пресса: возможности осуществления деформации при постоянном значении технологической силы, снижении технологической силы в результате упругой деформации пресса, а также продолжении пластической деформации на этапе разгрузки пресса за счет накопленной энергии упругой деформации пресса;

– научном обосновании технических решений в процессе разработки нового двухмаховичного электромагнитного привода и разработки методики определения оптимальных конструктивных параметров, обеспечивающих максимальный КПД привода.

Достоверность результатов обеспечена обоснованным использованием теоретических зависимостей, допущений и ограничений, корректностью постановки задач, применением известных математических методов и подтверждается качественным и количественным согласованием результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, полученными как в лабораторных условиях, так и в процессе стендовых испытаний на заводах-изготовителях и промышленной эксплуатации специализированных прессов.

Работа выполнена на кафедре машин и технологий обработки металлов давлением Московского государственного индустриального университета. Экспериментальные исследования проведены в лаборатории кафедры, а также на АМО ЗИЛ, Коломенском заводе тяжелых станков, Воронежском ПО ТЯЖМЕХПРЕСС, ЦНИТИМ, Полтавском заводе искусственных алмазов и алмазного инструмента (ПЗИАиАИ), Винницком инструментальном заводе.

Практическая ценность. На основе конструкторских разработок, теоретических и экспериментальных исследований созданы специализированные прессы с вращающимся штамподержателем, предназначенные для штамповки осадкой с кручением. Реализация нового метода штамповки позволяет в несколько раз снизить требуемую силу деформирования, что дает возможность увеличить массу и размеры штампуемых изделий, повысить их точность за счет снижения давления на инструмент, особенно в центральной зоне. Сокращение эксплуатационных расходов достигается за счет увеличения стойкости инструмента, упрощения его конструкции и уменьшения расходов на ремонт. Более высокая производительность специализированных кривошипных прессов достигается как за счет увеличения на 20 – 30% быстроходности прессов вследствие снижения инерционности ведомых масс, так и за счет сокращения времени на переналадку штампов и ремонт прессов. Компактность прессов дает экономию производственных площадей. Новый электромагнитный

двухмаховичный привод винтовых прессов позволяет эффективно использовать их не только для штамповки с кручением, но и как универсальное оборудование.

Реализация работы в промышленности. Для промышленного внедрения высокоэффективных технологических процессов штамповки методом осадки с кручением спроектированы, изготовлены и сданы в эксплуатацию следующие специализированные прессы с вращающимся штамподержателем:

1 – модернизированные винтовые фрикционные прессы модели Ф127 силой 2,5 МН на ПЗИАиАИ для производства цилиндрических и конических корпусов алмазных кругов и Винницком инструментальном заводе для производства дисковых фрез;

2 – КГШП модели К04.196.840 силой 10 МН для производства дисковых фрез на Винницком инструментальном заводе и оборонной продукции для ЦНИТИМа;

3 – гидравлический пресс модели П0941 силой 12,5 МН для производства на Краснодарском станкостроительном заводе им. Седина осесимметричных деталей металлорежущих станков;

4 – гидравлический пресс модели К25.240.01 силой 10 МН для производства на ПЗИАиАИ корпусов алмазного инструмента больших размеров.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на II Международной научно-практической конференции «Образование – наука – инновационная деятельность» (Москва – МГИУ 2011), на VIII Международной практической конференции «DNY – VEDY 2012» (Прага, 2012), на XV Международной научно-технической конференции «Достижения и проблемы развития технологий и машин обработки металлов давлением» (Украина, Краматорск, 2012.), научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ГОУ ВПО «Тульский государственный университет» (Тула, 2010 – 2012 гг.), а также на научных семинарах кафедр: технологии обработки металлов давлением МГТУ им. Н.Э. Баумана, кузовостроения и обработки давлением Университета машиностроения «МАМИ», систем пластического деформирования МГТУ «Станкин».

Публикации. По теме диссертации опубликована 61 работа, в том числе 35 научно-технических статей, 19 а.с. СССР и 7 патентов.

На защиту выносятся:

– научно обоснованные конструкции специализированных винтовых, кривошипных и гидравлических прессов с вращающимся штамподержателем для штамповки методом осадки с кручением;

– методика оптимизации конструктивных параметров прессов, обеспечивающих минимальные капитальные и эксплуатационные расходы прессов;

– результаты расчетов кинематических, силовых и энергетических параметров специализированных прессов;

– математические модели новых конструкций двухмаховичного электромагнитного привода винтовых прессов, обеспечивающего высокую энергоемкость в условиях номинального режима работы электродвигателей;

– результаты теоретических и экспериментальных исследований по разработанным аналитическим моделям оптимизации конструктивных и энергетических параметров.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 179 наименований, содержит 365 страниц машинописного текста, 249 рисунков, 20 таблиц и приложение.

Автор выражает благодарность д.т.н., профессору, заведующему кафедрой МиТОМД МГИУ Субичу Вадиму Николаевичу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, необходимость создания специализированных прессов для реализации прогрессивной технологии штамповки методом осадки с кручением, обладающей рядом преимуществ по сравнению с традиционной штамповкой, обеспечивающей, в частности, снижение контактных нагрузок на инструмент и потребной силы деформирования, возможность получения тонкостенных деталей, обладающих повышенными свойствами и др.

В первом разделе выполнен обзор технологических процессов и оборудования для изготовления осесимметричных поковок. В совершенствовании производства имеются тенденции специализации изготовления осесимметричных поковок с целью сокращения затрат и повышения производительности. Для штамповки осесимметричных тонкостенных поковок используется как универсальное, так и специализированное оборудование, причем последнее применяют для изготовления крупногабаритных тонкостенных изделий (штамповка обкатыванием).

Исследования осадки с кручением, начатые в 70-е годы прошлого столетия в Уральском политехническом институте (Буркин С.П., Леванов А.Н.), Заводе – втузе при ЗИЛе (Субич В.Н., Ганаго О.А.) и МВТУ им. Н.Э. Баумана (Сафонов А.В., Дмитриев А.М.), проводятся в настоящее время во многих научных коллективах: Уфимском ГАТУ (Валиев Р.З., Рааб Г.И.), Нижегородском ГТУ (Михаленко Ф.П., Шнейберг А.М.), Тульском ГТУ (Яковлев С.С.), Московской ГАПИИ (Воронцов А.П.) и др.

На основании анализа теории течения деформируемого металла в тонком слое методами комбинированного нагружения установлены параметры, влияющие на технологическую силу, контактные нагрузки, а также энергетические характеристики, взаимосвязанные с кинематикой процесса, подтвержденные многочисленными экспериментальными исследованиями. Следует отметить, что эксперименты проводятся на лабораторных установках. Как правило, это гидравлические прессы, оснащенные простейшими механизмами для вращения штамподержателя.

Отсутствуют методики расчетов и проектирования прессов с вращающимся штамподержателем, поэтому, несмотря на теоретические и экспериментальные исследования, доказывающие преимущества штамповки методом осадки с кручением, специализированное оборудование для реализации данной технологии не создается. На основании анализа патентной и технической литературы, а также производственного опыта сформулированы цели и обоснована постановка задачи исследования.

Во втором разделе проведено технологическое обоснование создания прессов с вращающимся штамподержателем. Для расчета технологических параметров штамповки методом осадки с кручением использована инженерная методика, основанная на фундаментальных работах профессора Субича В.Н. по исследованию комбинированных методов штамповки. За основу приняты результаты исследования осадки с кручением тонкого диска. Для расчета поковки сложной формы она разбивается на отдельные участки с указанием геометрических размеров каждого из них. Расчет ведется для каждого участка отдельно, начиная с наружного. Переходя от участка к участку, определяются нормальные напряжения σ_z по всей поверхности. Для расчета технологического момента поковки аппроксимируется диском с наружным радиусом R_H и высотой H_H , вычисляемой из условия равенства объемов: $\pi R_H^2 \cdot H_H = V_n$, где V_n – объем поковки.

Отличительной особенностью специализированных прессов является наличие двух главных исполнительных механизмов: для поступательного перемещения инструмента с линейной скоростью v и для его вращения с угловой скоростью ω . Взаимосвязь главных исполнительных механизмов определяет закон изменения отношения ω/v , а также конструктивные особенности прессов для штамповки с кручением, которые по признаку закономерности изменения отношения ω/v могут быть с жесткой связью вращательного и поступательного движений, обеспечивающей постоянное или переменное по мере осадки отношение ω/v , или с изменяющимся ω/v в зависимости от возникающих осевых сил и крутящих моментов.

Работа пластического формоизменения складывается из работы деформации технологической силой A_p по ходу ползуна h и работы деформации технологическим моментом A_M на угле поворота инструмента φ :

$$A_p = \int_{h_0}^h P_i \cdot dh; \quad A_M = \int_0^\varphi M_i \cdot d\varphi; \quad A_\Sigma = A_p + A_M$$

Отличительные особенности прессов для штамповки осадкой с кручением по сравнению с известными установками с вращающимся инструментом состоят в следующем:

- в процессе вращения инструмента преодолеваются относительно большие крутящие моменты;
- мощность, развиваемая при вращении инструмента, соизмерима с мощностью его поступательного перемещения;
- время контакта горячего металла со штампом должно быть минимальным, так как инструмент контактирует с деформируемым металлом по всей поверхности гравюры штампа;

– энергосиловые параметры штамповки накладывают определенные ограничения на кинематические параметры оборудования, прежде всего на соотношение угловой и поступательной скоростей штамподержателя.

В третьем разделе рассмотрены конструкции и проведены исследования винтовых прессов с вращающимся штамподержателем. Рассмотрены винтовые прессы двух конструктивных разновидностей: с жесткой и произвольной связью кинетических параметров – угловой ω и линейной v скоростей штамподержателя. Постоянное отношение ω/v имеет винтовой пресс с винтовым движением винта, к торцу которого жестко присоединен штамподержатель, выполненный в виде тела вращения. На рис. 1 показаны графики изменения максимальной силы и работы деформации в зависимости от величины хода винтовой нарезки винта прессы силой 4 МН. Расчеты показывают, что экономически обосновано создание специализированного винтового прессы, угол наклона винтовой нарезки винта которого должен находиться в пределах $3^\circ - 6^\circ$. Винтовые прессы с такой винтовой парой заклиниваются. Для реверса винта в конструкции прессов предусмотрен дополнительный механизм, выполненный в виде гидравлической подушки, встроенной в столе прессы (рис. 2). После окончания штамповки давление жидкости в гидравлической подушке сбрасывается, что обеспечивает расклинивание прессы.

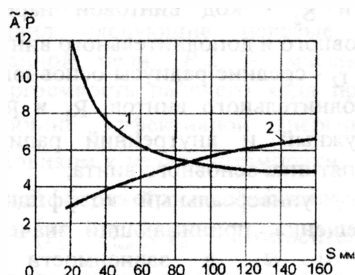


Рис. 1. Зависимость относительных работ (1) и силы деформирования (2) от хода винтовой нарезки

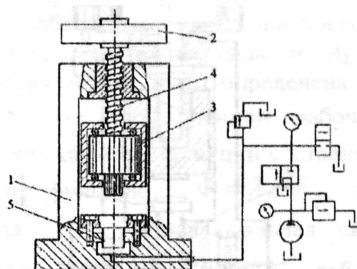


Рис. 2. Винтовой пресс: 1 – станина; 2 – маховик; 3 – штамподержатель; 4 – винт; 5 – гидродушка

Винтовые прессы с жесткой связью кинематических параметров имеют недостатки: низкий КПД и отсутствие отскока штамподержателя. Эти недостатки устраняются в винтовых прессах с инерционным механизмом вращения штамподержателя. На рис. 3 представлена конструктивная схема винтового прессы с вращательным движением винта, в котором указанный механизм выполнен в виде дополнительной несамотормозящейся пары, в которой гайка 2 жестко установлена в станине прессы, на винте 3 закреплены штамподержатель 1 (на верхнем конце) и дополнительный маховик 4 (на нижнем конце). На штамподержатель 1 при ударе действует технологическая сила P_T , под действием которой в винтовой паре возникает реактивный крутящий момент, стремящийся повернуть дополнительный маховик 4.

Вращению маховика препятствуют его инерция и технологический момент M_T . При правильном выборе момента инерции J_2 и параметров винтовой пары можно добиться технологически необходимого режима штамповки с кручением. На основе инерционного механизма разработаны конструкции винтовых специализированных прессов с винтовым и вращательным движением винта, с верхним и нижним расположением дополнительного маховика. Математическая модель представляет пресс в виде двух взаимосвязанных вращающихся инерционных систем: одна тормозящаяся с моментом инерции J_1 – рабочий маховик и основной винт, другая разгоняющаяся с моментом инерции J_2 – дополнительный маховик и винт. На обе системы во время штамповки действуют технологическая сила P_T и технологический крутящий момент M_T . Динамические уравнения движения инерционных масс для всех прессов представляются в обобщенном виде:

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = -P_T \cdot (a_1 + b_1 + b_2) - M_T \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = P_T \cdot (a_2 - a_1 - b_1 - b_2) - M_T \end{cases}$$

где $a_1 = \frac{S_1}{2\pi}$; $a_2 = \frac{S_2}{2\pi}$; $b_1 = f \cdot r_1$; $b_2 = f \cdot r_2$;

$$b_1 = f \cdot \frac{R_1^3 - R_2^3}{R_1^2 - R_2^2}; \quad b_2 = f \cdot r_2;$$

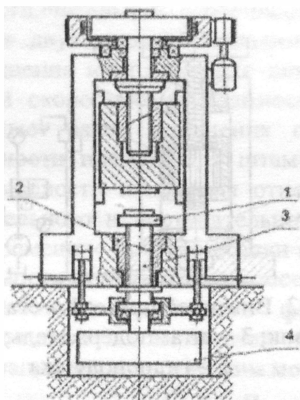


Рис. 3. Конструктивная схема винтового пресса с инерционным механизмом вращения штамподержателя:

- 1 – штамподержатель; 2 – гайка;
3 – винт; 4 – маховик

S_1 и S_2 – ход винтовой нарезки основного и дополнительного винтов, r_1 и r_2 – средние радиусы основного и дополнительного винтов, R_1 и R_2 – наружный и внутренний радиусы подпятника основного винта;

a_3 – универсальный коэффициент замещения, принимающий значения a_1 и a_2 в зависимости от особенностей расчета каждой из схем прессов. Скорости поступательного перемещения v_1 , v_2 и угловая скорость ω_1 вращения штамподержателей относительно друг друга определяются по формулам:

$$v_1 = (\omega_1 + \omega_5) \cdot a_1;$$

$$v_2 = \omega_2 \cdot a_2; \quad \omega_1 = \omega_3 + \omega_4, \quad \text{где } \omega_3, \omega_4, \omega_5 \text{ – универсальные коэффициенты замещения, принимающие действительные значения угловых}$$

скоростей штамподержателей в зависимости от особенностей расчета каждой из схем прессов. Разработанная математическая модель позволяет

определить кинематические, силовые и энергетические параметры как технологии штамповки, так и нагружения пресса.

Главным параметром, на основе которого производится расчет пресса, является номинальная сила. Особенность прессов для штамповки с кручением состоит в том, что максимальная сила штамповки одной и той же поковки зависит от кинематических параметров пресса, изменение которых может привести к многократному снижению силы. Однако необходимо учитывать, что снижение силы штамповки сопровождается таким же многократным увеличением работы деформирования. Поэтому проектирование необходимо начинать с определения оптимальных параметров пресса.

При одинаковом технологическом назначении, производительности и качестве получаемых изделий конкурентоспособность пресса оценивается по его капитальным и эксплуатационным расходам. Стоимость пресса определяется его массой, а масса в свою очередь зависит от номинальной силы пресса P_H , определяемой по максимальной силе штамповки $P_{\max}$, т.к. этот параметр лежит в основе расчетов на прочность деталей пресса и их сечений. Основная статья эксплуатационных затрат – это затраты на электроэнергию, зависящие от энергоемкости технологической операции.

Основная цель оптимизации – минимизация капитальных и эксплуатационных затрат проектируемого пресса. Проведенный анализ выявил следующие целевые функции, обеспечивающие достижение заданной цели: $P_{\max}$ – максимальная технологическая сила и A_{Σ} – энергоемкость рабочего хода пресса, которая может быть определена по величине эффективной энергии $T_{\text{эф}} = 0,5 \cdot J_1 \cdot \omega_1^2$, накопленной рабочим маховиком к началу штамповки. Совокупность целевых функций составляет новый параметр – обобщенную целевую функцию $\Phi = \lambda_p \cdot \lambda_A$, где $\lambda_p = (P_0 - P_{\max}) / P_0$ – относительная сила (P_0 – максимальная сила штамповки без кручения) и $\lambda_A = A_0 / A_{\Sigma}$ – относительная работа (A_0 – работа формоизменения без кручения). Величины целевых функций $P_{\max}$ и $T_{\text{эф}}$ зависят от следующих параметров пресса (параметров управления): J_2 – момента инерции разгоняющейся системы и $\alpha_2(S_2)$ – угла наклона (хода) дополнительной винтовой пары.

Программная реализация разработанной методики представлена на примере винтового пресса силой 4 МН. Вначале проводилось исследование влияния момента инерции дополнительного маховика J_2 при фиксированном значении параметра $\alpha_2 = 9^\circ$, для чего строили графики технологических сил осадки P_T в диапазоне значений $J_2 = 20 \dots 40 \text{ Нмс}^2$. Энергетические показатели процесса осадки с кручением в зависимости от J_2 представлены кривыми работы осевых сил A_p , работы крутящего момента A_M и суммарной работы A_{Σ} . На основании полученных данных построены графики изменения относительных сил λ_p и относительных работ λ_A , а также график обобщенной целевой функции $\Phi = \lambda_p \cdot \lambda_A$ в зависимости от момента инерции J_2 (рис. 4, а).

Наибольшее значение функция Φ принимает при $J_2 = 25 \text{ Нмс}^2$. Это значение момента инерции дополнительного маховика принято фиксированным для исследования влияния угла наклона винтовой нарезки дополнительного винта α_2 . Далее строились графики технологической силы P_T в зависимости от угла α_2 в диапазоне $\alpha_2 = 7 \dots 11^\circ$ при моменте инерции $J_2 = 25 \text{ Нмс}^2$, и по приведенной выше методике расчета получены графики $P_{\max} = f(\alpha_2)$ и $(A_P, A_M, A_\Sigma) = f(\alpha_2)$, на основании которых построены графики $(\lambda_P, \lambda_A, \Phi) = f(\alpha_2)$ (рис. 4, б). Обобщенная целевая функция Φ имеет экстремум при $\alpha_2 = 9^\circ$. Найденные конструктивные параметры $J_2 = 25 \text{ Нмс}^2$ и $\alpha_2 = 9^\circ$, обеспечивающие оптимальные режимы работы, положены в основу расчёта прессы.

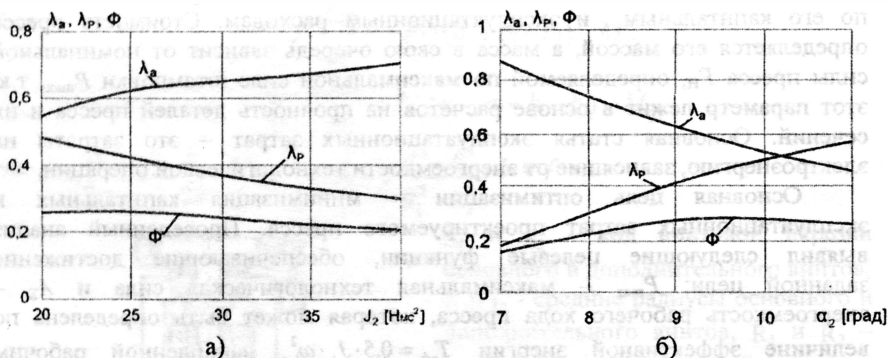


Рис. 4. Графики изменения относительной силы λ_P , относительной работы λ_A и обобщенной целевой функции Φ в зависимости от момента инерции дополнительного маховика J_2 (а) и от угла наклона резьбы винта α_2 (б)

На рисунке 5 представлен график изменения угловых скоростей маховиков: ω_1 – рабочего и ω_2 – дополнительного. Угловая скорость ω_2 интенсивно возрастает до величины $\omega_2 = 15,3 \text{ 1/с}$ при радиусе диска $r = 65 \text{ мм}$, а затем резко падает до величины $\omega_2 = 0,59 \text{ 1/с}$ в момент окончания штамповки, что связано со снижением технологической силы P_T , а следовательно, и реактивного момента M_P в конце штамповки и торможением дополнительного маховика технологическим моментом M_T . Силовые параметры штамповки представлены кривыми, изображенными на рис. 6.

В процессе деформации заготовки под действием технологической силы штамповки происходят упругие деформации деталей прессы, замедляющие скорость деформирования заготовки. Технологическая сила штамповки P_T определяется параметром кручения q , зависящим от скорости деформирования. Последняя, в свою очередь, зависит от скорости упругого перемещения стола, для определения которой требуется знать

действительную силу штамповки P_T . В связи с этим данная задача решена численным методом путем итерационного приближения технологической силы P_T к силе упругой деформации прессы P_i при одном и том же упругом перемещении стола δ_i .

Сравнение графиков изменения технологической силы осадки плоского диска (рис. 6), где кривая 1 характеризует силу осадки без учета жесткости прессы, а кривая 2 – с учетом жесткости прессы, показывает, что упругие деформации прессы влияют на характер изменения технологической силы.

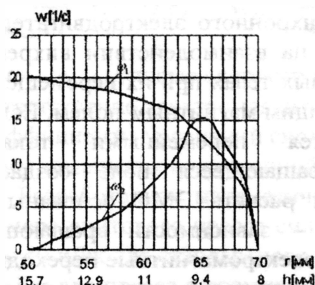


Рис. 5. Графики изменения угловых скоростей ω_1 , ω_2

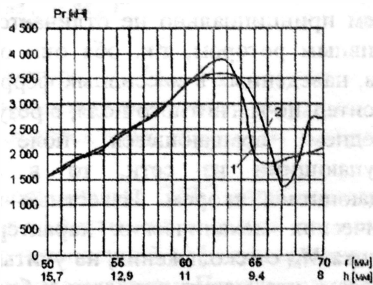


Рис. 6. Графики изменения силы P_T без учета (1) и с учетом (2) жесткости прессы

При значении коэффициента жесткости прессы $c = 2,35$ МН/мм максимальная сила штамповки снижается с 3,84 до 3,59 МН (на 6,5%). Рассматриваемый пресс имеет следующие энергетические показатели: рабочий маховик запасает к началу штамповки эффективную энергию $T_{эф} = 74,9$ кДж, КПД рабочего хода составляет $\eta = 55,2\%$. Энергоемкость операции осадки с кручением по отношению к осадке поступательно перемещающимся инструментом увеличивается с 25,9 до 44,2 кДж (в 1,7 раз), а сила штамповки снижается в 2,1 раза.

Расчёты показывают, что для винтовых прессов с вращающимся штамподержателем требуется повышенная (в среднем в 2 раза) эффективная энергия, а следовательно, мощность привода, в связи с чем поставлена задача создания нового привода, способного накапливать во время разгона маховика существенно большую кинематическую энергию.

Четвертый раздел посвящен исследованию винтовых прессов с двухмаховичным приводом, разработанным на базе электромагнитных муфт скольжения (ЭМС). На рис. 7, а представлена конструкция прессы с жесткой связью маховика с винтом. Привод состоит из наружного маховика-якоря в виде массивного кольца, связанного с приводным электродвигателем посредством ременной передачи. Якорь выполняет роль маховика-накопителя. Внутри него установлен индуктор с электромагнитными катушками, на которые подаются токи возбуждения, в результате чего возникает вращающий момент, величина которого зависит от разности

скоростей вращения якоря и индуктора, или скольжения. Индуктор является рабочим маховиком, жестко соединенным с винтом. Вращающий момент разгоняет рабочий маховик и тормозит маховик - накопитель. Достоинством электромагнитной связи маховиков является их бесконтактная эксплуатация, низкая стоимость и высокая надёжность и долговечность в работе.

Приведенная схема винтового пресса с двухмаховичным электромагнитным приводом представляет пресс в виде двух вращающихся систем – ведущей и ведомой, взаимодействующих между собой посредством электромагнитного поля (рис. 7, б). Электромагнитная муфта с массивным якорем принципиально не отличается от асинхронного электродвигателя с массивным ротором, т.к. оба они основаны на взаимодействии вихревых токов, наведенных в массивных ферромагнитных телах при их перемещении относительно магнитного поля, с результирующим магнитным полем. Если в последнем вращающееся поле создается переменными токами, поступающими из сети, то в ЭМС вращающееся поле создается вращающимся якорем. Известные методики расчета ЭМС основаны на статических механических характеристиках – зависимости вращающего момента M_M от скольжения, не учитывающих электромагнитные переходные процессы, что может привести к большим погрешностям при определении моментов и токов, особенно в пусковых режимах.

Часто электромагнитную муфту скольжения называют асинхронной, так как асинхронные муфты с массивным якорем принципиально не отличаются от асинхронных электродвигателей с массивным ротором.

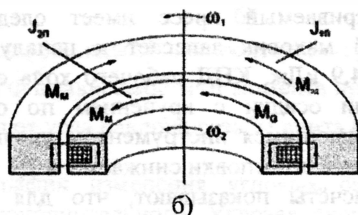
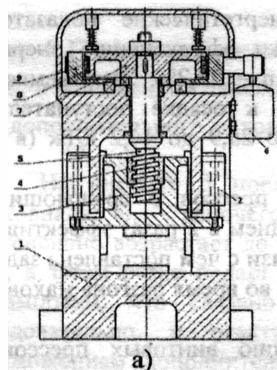


Рис. 7. Конструктивная (а) и приведённая (б) схемы винтовых прессов с двухмаховичным электромагнитным приводом: 1 – станина; 2 – возвратные цилиндры; 3 – ползун; 4 – гайка; 5 – винт; 6 – электродвигатель; 7 – маховик; 8 – катушки; 9 – якорь; 10 – муфта

Более точные решения могут быть получены, если в качестве аналога ЭМС использовать трехфазную машину с вращающимся статором и ротором.

Аналог электромагнитной муфты скольжения описывается следующей системой уравнений в синхронной системе координат:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\Psi_{\beta 1}}{dt} &= \frac{U_{\Pi}}{\sqrt{3}} - \lambda'_s \cdot \Psi_{\beta 1} + \lambda'_s \cdot K_r \cdot \Psi_{\beta 2} ; \quad \frac{d\Psi_{\theta}}{dt} = (\omega_1 - \omega_2) \cdot P \cdot \Psi_{\beta 2} - \lambda'_r \cdot \Psi_{\theta} ; \\ \frac{d\Psi_{\beta 2}}{dt} &= -(\omega_1 - \omega_2) \cdot P_{\Pi} \cdot \Psi_{\alpha 2} - \lambda'_r \cdot \Psi_{\beta 2} + \lambda'_r \cdot K_s \cdot \Psi_{\beta 1} ; \\ M_M &= \frac{3}{2} P_{\Pi} \cdot \frac{K_r}{\sigma \cdot L_s} \cdot \Psi_{\theta} \cdot (\Psi_{\beta 1} - K_r \cdot \Psi_{\beta 2}) ; \\ \frac{d\omega_1}{dt} &= \frac{1}{J_1} \cdot (M_{эд} - M_M) ; \quad \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2} \cdot (M_M - M_G) . \end{aligned} \right.$$

где ω_1, ω_2 – угловые скорости статора и ротора, $M_M, M_{эд}, M_G$ – моменты соответственно электромагнитной муфты, электродвигателя и веса ползуна. Коэффициенты уравнений системы выражаются через параметры Т-образной схемы замещения асинхронной машины.

Разработанная математическая модель аналога ЭМС апробирована на примере винтового пресса силой 4 МН с эффективной энергией подвижных масс 40 кДж для стандартного пресса и с повышенной эффективной энергией 80 кДж для пресса с вращающимся штамподержателем. Принята следующая методика математического моделирования. Для всех режимов разгона рабочего маховика винтового пресса принято время полного перемещения ползуна приблизительно 1 с, при этом максимальная угловая скорость рабочего маховика должна иметь величину $28,5 \text{ с}^{-1}$, что соответствует эффективной энергии 40 кДж.

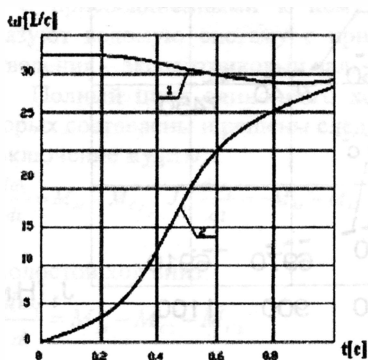


Рис. 8. График изменения угловых скоростей: 1 – статора; 2 – ротора

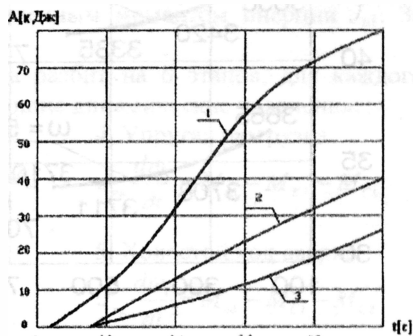


Рис. 9. Графики изменения: 1 – затраченной энергии статора; 2 – накопленной энергии; 3 – работы электродвигателя

Кинематика хода разгона характеризуется кривыми изменения угловых скоростей статора ω_1 и ротора ω_2 (рис. 8). Энергетика привода в период разгона маховика представлена на рис. 9 графиками изменения кинетической энергии ведущего маховика (затраченная энергия, кривая 1) и рабочего

маховика (накопленная энергия, кривая 2), а также графиком работы электродвигателя (кривая 3).

Конечные результаты исследования изображены в виде графика целевой обобщенной функции (КПД хода разгона) в зависимости от параметров управления: начальной угловой скорости статора ω_{1H} и его момента инерции J_1 (рис. 10). Заданный разгон ротора можно осуществить при $\omega_{1H} = 33 \text{ с}^{-1}$, $J_1 = 400 \text{ Нмс}^2$ и максимальном электромагнитном моменте $M_{M\max} = 3860 \text{ Нм}$. Эти параметры можно принять как оптимальные для прессы с $T_{\text{эф}} = 40 \text{ кДж}$, так как они обеспечивают максимальный КПД хода разгона $\eta = 50,7 \%$. Аналогичные исследования выполнены для привода винтового прессы с эффективной энергией 80 кДж , результаты которых позволили установить следующие оптимальные параметры привода: $\omega_{1H} = 33 \text{ с}^{-1}$, $J_1 = 700 \text{ Нмс}^2$ и $M_{M\max} = 8820 \text{ Нм}$, обеспечивающие к.п.д. $\eta = 47\%$. Приведенные данные показывают, что увеличение эффективной энергии прессы с 40 кДж до 80 кДж приводит к снижению КПД привода на $7,3\%$.

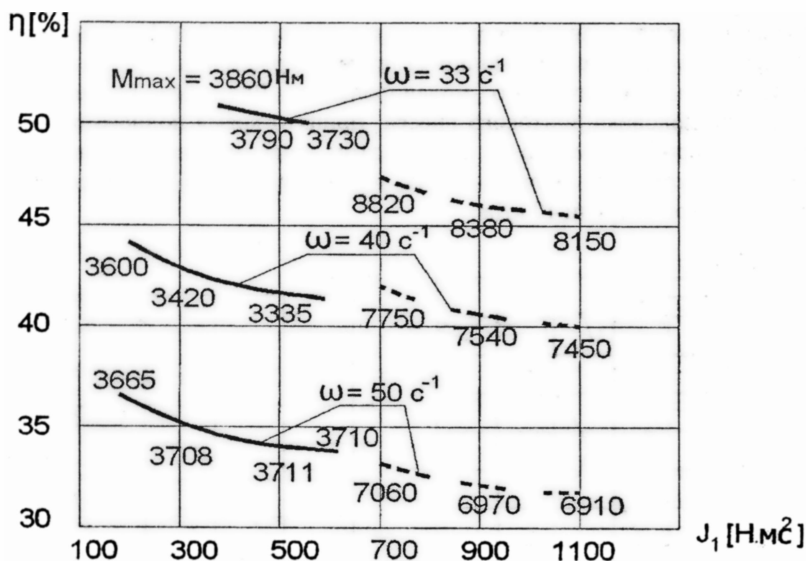


Рис. 10. Графики изменения КПД хода разгона η в зависимости от момента инерции статора J_1 и его начальной угловой скорости ω_{1H} :

$T_{\text{эф}} = 40 \text{ кДж}$ (—); $T_{\text{эф}} = 80 \text{ кДж}$ (---)

В пятом разделе рассмотрены конструкции и проведено исследование специализированных кривошипных прессов с вращающимся штамподержателем. При создании таких прессов использован винтовой механизм, отличающийся тем, что винт и гайка совершают одновременно

поступательное перемещение посредством двух ползунов – наружного, перемещающегося в направляющих станины, и внутреннего, перемещающегося в направляющих наружного ползуна. Во время штамповки вращение винта, связанного со штамподержателем, достигается за счет опережающего движения гайки относительно винта.

Для обеспечения кинематики рабочего хода специализированный пресс имеет два главных исполнительных механизма: для поступательного перемещения винта и поступательного перемещения гайки, кинематически связанных между собой. В кривошипном трехэксцентриковом прессе (рис. 11) центральный кривошипно-ползунный механизм приводит в движение внутренний ползун 3 и связанный с ним винт 4, а движение гайки 7, встроенной в наружный ползун, обеспечивается другим кривошипно-ползунным механизмом, включающим два боковых эксцентрика, сочлененных с боковыми шатунами 6. Центральный эксцентрик развернут в направлении вращения эксцентрикового вала относительно боковых эксцентриков на угол γ .

Для определения действительных угловых и линейных перемещений, скоростей и ускорений, а также расчета силовых и энергетических характеристик прессы разработана математическая модель, в которую входят технологические, кинематические и динамические уравнения. Используя метод приведения масс, реальная кинематическая схема прессы заменена расчетной двухмассовой системой, все звенья которой жесткие, за исключением станины. Электродвигатель, шкив и маховик образуют ведущую систему с приведенным моментом инерции $J_{н2}$, а эксцентриковый вал с присоединенными к нему деталями исполнительных механизмов образуют ведомую систему с приведенным моментом инерции $J_{н1}$. Звено приведения – эксцентриковый вал.

Полный цикл одиночного хода разбит на 6 этапов, для каждого из которых составлены и решены следующие динамические уравнения:

1. Включение муфты:

$$J_{н1} \frac{d\omega_1}{dt} = M_M - M_{C2}; \quad J_{н2} \frac{d\omega_2}{dt} = -M_M - M_{C1} + M_{эд}$$

4. Упругая разгрузка:

$$J_{нс} \frac{d\omega_1}{dt} = M_{эд} - M_{K2} - M_{C1}$$

2. Холостой ход вниз:

$$J_{нс} \frac{d\omega_1}{dt} = M_{эд} - M_{C1} - M_{C2}$$

5. Холостой ход вверх:

$$J_{нс} \frac{d\omega_1}{dt} = M_{эд} - M_{C1} - M_{C2}$$

3. Рабочий ход:

$$J_{нс} \frac{d\omega_1}{dt} = M_{эд} - M_{K1} - M_{C2}$$

6. Торможение главного вала и разгон маховика:

$$J_{н1} \frac{d\omega_1}{dt} = M_T - M_{C2}; \quad J_{н2} \frac{d\omega_2}{dt} = M_{эд} - M_{C1}$$

где M_M и M_T – моменты муфты и тормоза; M_{C1} и M_{C2} – моменты сопротивления движению ведущих и ведомых масс, приведённых к главному валу; $M_{эд}$ – текущий момент электродвигателя, приведённый к главному

валу; M_{K1} , M_{K2} – крутящие моменты на главном валу при рабочем ходе и разгрузке пресса; ω_1 и ω_2 – угловые скорости ведомых и ведущих масс.

Вначале проводятся исследования с целью определения оптимальных конструктивных параметров кривошипного пресса, для чего принимаются следующие целевые функции:

$P_T^{\max}$ – максимальная технологическая сила штамповки;

$M_k^{\max}$ – максимальный крутящий момент на эксцентриковом валу;

A_0 – суммарная работа, затраченная электродвигателем на цикл штамповки;

η – коэффициент полезного действия пресса.

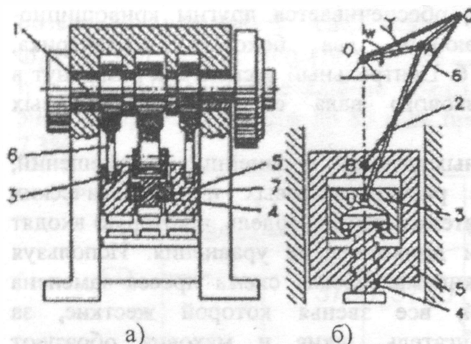


Рис. 11. Конструктивная (а) и кинематическая (б) схемы КГШП с трехэксцентриковым валом

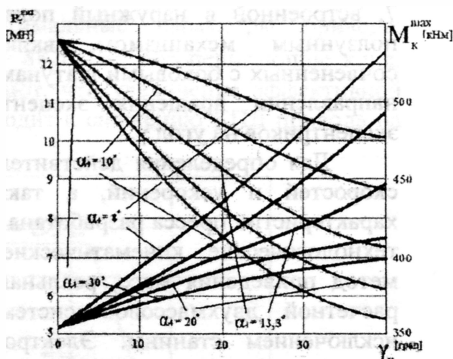


Рис. 12. Обобщенные графики изменения силы $P_T^{\max}$ и $M_k^{\max}$

Параметры пресса (параметры управления), влияющие на процесс штамповки с кручением, а следовательно, и на целевые функции: γ – угол разворота эксцентриков и α_B – угол наклона резьбы винтовой нарезки винта.

Исследования выполнены применительно к КГШП силой 10 МН путём моделирования осадки с кручением плоских дисков с размерами: диск А – $D = 200$ мм; $H = 9$ мм; диск В – $D = 183$ мм; $H = 7$ мм. Для анализа влияния угла разворота эксцентриков кривошипного вала в диапазоне $\gamma = 10^\circ - 40^\circ$ рассчитывалась осадка заготовок до заданных размеров при фиксированном значении угла наклона винтовой линии $\alpha_B = 13.3^\circ$. Для анализа влияния угла подъема резьбы винта в диапазоне $\alpha_B = 8^\circ - 30^\circ$ проводились расчёты при фиксированном значении угла разворота эксцентриков $\gamma = 30^\circ$. Аналогично строились графики крутящих моментов на эксцентриковом валу $M_{кр}$. По полученным графикам находились максимальные значения $P_T^{\max}$ и $M_k^{\max}$ и строились обобщенные кривые изменения целевых функций $P_T^{\max}$, $M_k^{\max}$ и A_0 в зависимости от параметров управления γ и α_B (рис. 12, 13).

На основании полученных данных рассчитывались относительные целевые функции λ_P ; λ_M ; λ_A и новый параметр – обобщенная целевая функция

$\Phi = \lambda_p \cdot \lambda_m \cdot \lambda_A$. Значения Φ получены во всём исследуемом диапазоне углов γ и α_B и зафиксированы в координатах $\gamma - \alpha_B$ в виде точек. Точки с одинаковыми значениями Φ соединены линиями, в результате чего получено поле значений обобщенной функции Φ в координатах $\gamma - \alpha_B$ (рис. 14). В этом поле можно выделить зону минимальных значений функции Φ , в которой находятся оптимальные значения целевых функций, определяемые параметрами управления: углом разворота эксцентриков $\gamma = 30^\circ$ и углом подъема резьбы винтовой пары $\alpha_B = 16,6^\circ$. Эти конструктивные параметры пресса положены в основу расчета специализированного кривошипного пресса силой 10 МН.

На рисунке 15 приведены графики технологической силы при осадке диска на прессе с жесткостью $C = 8$ МН/мм (кривая 1) и на прессе с нулевой податливостью $C = \infty$ (кривая 2), из которого следует, что жесткость пресса с вращающимся штамподержателем существенно изменяет график технологической силы штамповки. Упругие деформации пресса приводят к уменьшению скорости осадки заготовки, а следовательно, к возрастанию параметра кручения q , что приводит к уменьшению максимальной силы приблизительно на 1 МН или на 13%, тогда как жесткость обычных прессов не влияет на технологические параметры штамповки, а только на точностные характеристики изделий.

После прохождения ползуном мертвой точки начинается этап разгрузки, характеризуемый движением ползуна вверх и контактом верхнего инструмента с поковкой. Стол в этот период также движется вверх вследствие упругих деформаций пресса. Увеличение параметра кручения q снижает несущую способность осаживаемого слоя, вследствие чего деформация продолжается под действием уменьшающихся нагрузок, так как скорость стола пресса превышает скорость перемещения ползуна вверх. На угле поворота эксцентрикового вала $\alpha = 183^\circ$ эти скорости выравниваются, и в дальнейшем происходит разгрузка пресса без формоизменения заготовки, которая заканчивается при угле поворота эксцентрикового вала 185° .

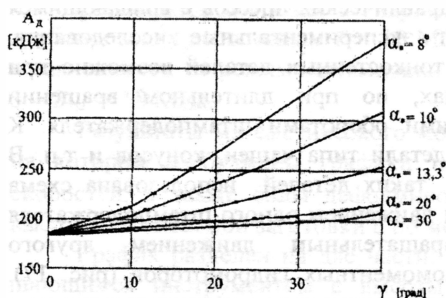


Рис. 13. Обобщенные графики изменения работы электродвигателя A_d

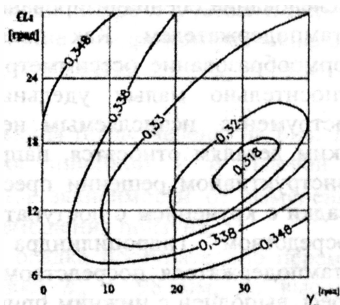


Рис. 14. Значение обобщенной целевой функции Φ в двухмерном пространстве

Отмеченное обстоятельство принципиально отличает прессы с вращающимся инструментом от прессов с поступательным перемещающимся инструментом. У последних упругая деформация прессы затрачивается, в основном, на преодоление трения в сочленениях звеньев механизмов, тогда как в прессах с вращающимся штамподержателем часть этой энергии расходуется на формоизменение поковки, что повышает коэффициент полезного действия специализированных прессов.

Энергетика прессы характеризуется данными, приведенными на рис. 16. За время полного цикла одиночного хода электродвигатель затрачивает работу $A_d = 258$ кДж. Полезная работа, затраченная на осадку заготовки и ее кручение, составляет 85 кДж, т.е. пресс работает с КПД, равным 33%. Такой же порядок (92,9 кДж, 36%) имеют потери на трение в деталях и узлах прессы. Последняя треть энергетических затрат связана с включением муфты (52,4 кДж, 20%) и торможением ведомых масс (28,5 кДж, 11%) (в сумме 80,9 кДж, 31%).

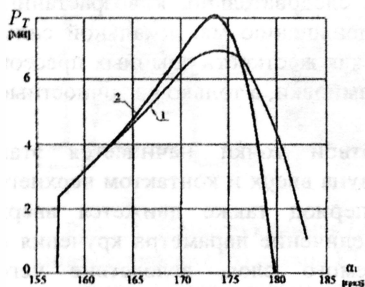


Рис. 15. Графики изменения технологической силы P_T при осадке дисков: 1 – $C = 8$; 2 – $C = \infty$

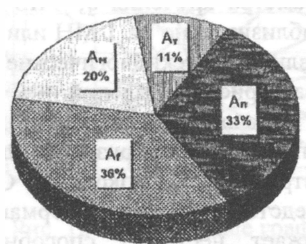


Рис. 16. Графическое представление баланса работ за рабочий ход прессы

В шестом разделе рассмотрены конструкции и проведено исследование специализированных гидравлических прессов с вращающимся штамподержателем. Как показывают экспериментальные исследования, формообразование осесимметричных тонкостенных деталей возможно при относительно малых удельных силах, но при длительном вращении инструмента, исчисляемым несколькими оборотами штамподержателя. К таким деталям относятся, например, детали типа чашек, конусов и т.п. В конструктивном решении прессы для таких деталей использована схема осадки с кручением с поступательным движением одного штамподержателя посредством гидроцилиндра и вращательным движением другого штамподержателя посредством высокомоментных гидромоторов (рис. 17). Пресс выполнен с нижним приводом поступательного перемещения ползуна и верхним приводом вращения штамподержателя, что обеспечивает удобство монтажа и обслуживания верхнего привода и исключает попадание на него окалины и технологической смазки. Пресс может работать как от

индивидуального насосного привода, так и от насосно-аккумуляторного привода.

Для исследования пресса с насосно-аккумуляторным приводом расчетная схема приводится к динамической модели двухмассовой системы. Первая из них с поступательно перемещающимися деталями пресса включает в себя плунжер силового гидроцилиндра с присоединенными к нему деталями общей массой m . Вторая система вращающихся деталей пресса содержит штамподержатель и зубчатое колесо, соединенные валом (момент инерции J_k), и приводные шестерни, посаженные на роторы гидромоторов (момент инерции J_m). Рабочая жидкость давлением P_a подается из аккумулятора к силовому гидроцилиндру и гидромоторам.

Уравнения движения поступательно перемещающейся и вращающейся систем имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{dv}{dt} = P_u \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_u^2 \cdot \eta_u - P_T - m \cdot g \\ J_{np} \frac{d\omega}{dt} = P_z \cdot \frac{M_n}{P_n} \cdot i \cdot N - M_T - M_f \end{array} \right.$$

где P_u и P_T – давление соответственно в гидроцилиндре и гидромоторе; η_u – КПД гидроцилиндра; P_n ; M_n – номинальное давление и номинальный момент (момент при давлении P_n) гидромоторов; $M_f = f_k \cdot r_k \cdot P_T$ – момент трения в подшипнике качения при радиусе качения r_k и коэффициенте трения f_k ; N – число гидромоторов; $J_{np} = J_k + J_m \cdot i^2$ – приведенный момент инерции вращающихся масс.

Моделирование проводилось по следующей методике. Заготовка осаживалась до размеров $d_k = 210$ мм; $h_k = 8$ мм, в два этапа. Первый этап – осадка без кручения до размеров $d_1 = 148$ мм; $h_1 = 16$ мм; второй этап – осадка с кручением. В момент, когда размеры заготовки достигают величины d_1 , h_1 , включаются гидромоторы и начинается вращение штамподержателя. Процесс продолжается до тех пор, пока заготовка не достигнет размеров d_k , h_k . Принимается давления в гидравлическом цилиндре с учетом потерь в трубопроводах постоянным $P = 18$ МПа. Давление в гидромоторах менялось в зависимости от режима штамповки 1 – $P_{гм} = 12$ МПа; 2 – $P_{гм} = 15$ МПа; 3 – $P_{гм} = 18$ МПа.

Результаты математического моделирования представлены на рис. 18, на котором изображены графики изменения линейной v и угловой ω скоростей, а также силы деформирования P_T зависимости от изменения высоты осаживаемой заготовки h по мере перемещения ползуна.

График разделен на две части: 1 - я – осадка поступательно перемещающимся инструментом с высоты заготовки $h_0 = 98$ мм, до высоты $h_1 = 16$ мм; 2 - я – осадка заготовки поступательно перемещающимся ползуном и вращающимся штамподержателем (осадка с кручением) с высоты $h_1 = 16$ мм до высоты $h_k = 8$ мм.

Осадка без кручения характеризуется резким возрастанием силы деформирования до момента включения гидромоторов, после чего интенсивность роста силы уменьшается, и к концу осадки технологическая сила падает в зависимости от величины угловой скорости вращения штамподержателя. Максимальная сила осадки с кручением снижается по сравнению с обычной осадкой в 1,3 – 1,87 раза в зависимости от режима осадки. Для конечной стадии осадки эти цифры составляют 2 – 3,1.

При насосном безаккумуляторном приводе рабочая жидкость подается в гидравлические цилиндры пресса непосредственно от насосов с постоянным расходом жидкости. В самом прессе поток жидкости разделяется на два: одна его часть поступает в гидроцилиндр, а другая – в гидромоторы. Давление жидкости в системе определяется, с одной стороны, сопротивлением металла пластическому деформированию, а с другой – крутящим моментом при вращении штамподержателя. Принимается, что одна часть объема жидкости $\Delta V - K \cdot \Delta V$ поступает на перемещение плунжера гидроцилиндра, а другая часть этого объема жидкости $(1-K) \cdot \Delta V$ – на вращение штамподержателя, где K – коэффициент, принимающий значение 0,1...0,9 с определенным шагом.

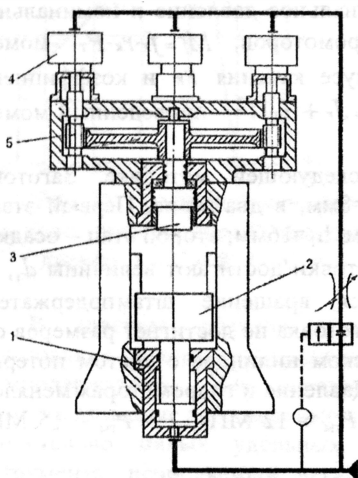


Рис.17. Конструктивная схема гидравлического пресса с гидромоторами на станине: 1 – цилиндр; 2 – ползун; 3 – штамподержатель; 4 – гидромоторы; 5 – зубчатая передача

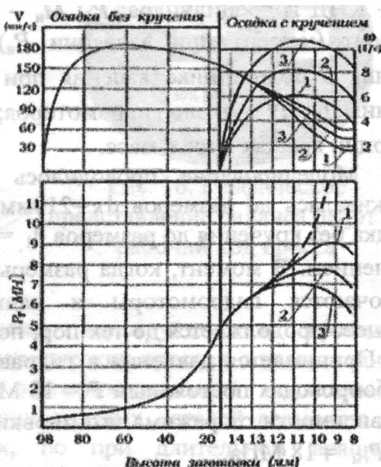


Рис.18. Графики изменения скоростей v и ω , а также технологической силы P_T в зависимости от высоты осаживаемой заготовки: 1 – $P_{ГМ} = 12$ МПа; 2 – $P_{ГМ} = 15$ МПа; 3 – $P_{ГМ} = 18$ МПа

Для каждого шага находятся скорости: линейная плунжера и угловая штамподержателя, а также давление жидкости в гидроцилиндре P_u и

гидромоторах P_m . Методом итераций находится такое значение коэффициента K , при котором выполняется условие $P_u - P_m \leq \xi$, где ξ – величина давления, близкая к нулю.

Результаты расчётов представлены на рис. 19, на котором изображены графики изменения давления в гидросистеме (2), силового нагружения пресса технологической силой P_T (1) и технологическим моментом M_T (3), а также расчётная кривая P_T (4) осадки заготовки без кручения. Штамповка происходит в автоматическом режиме, когда давление в гидросистеме устанавливается за счёт изменения расходов жидкости в гидроцилиндр и гидромоторы.

В связи со сложностью аналитического решения задачи определения основных параметров процесса штамповки с кручением цилиндрических заготовок из идеально пластичного материала известные исследования выполнены с применением упрощающей кинематической гипотезы. Расширение класса технологических процессов, реализуемых на прессах с вращающимся инструментом, и методик расчёта и проектирования разрабатываемых типов оборудования достигается на основе более общей постановки задачи с применением численных методов. Такая задача поставлена и реализована в программном комплексе «Kручение». Расчёты проводились для процесса горячей осадки с кручением цилиндрической заготовки из стали 20ХГНМ с начальными размерами: $d_0 = 62,4$ мм; $h_0 = 17,7$ мм.

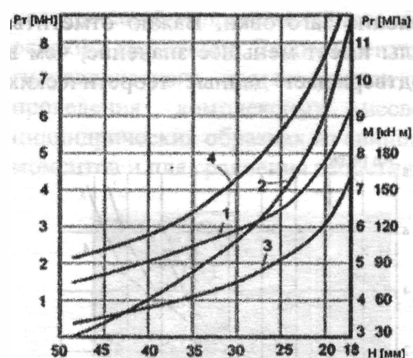


Рис.19. Графики технологической силы штамповки с кручением (1) и без кручения (4), технологического момента кручения (3) и давления (2) в гидросистеме в зависимости от высоты осаживаемой заготовки

штамподержатель – угловую скорость $\omega = 1 \frac{1}{c}$. Пресс настраивается на работу

в трех режимах в зависимости от максимальной силы P_{max} , развиваемой гидроцилиндром: 1 - $P_{max} = 500кН$; 2 - $P_{max} = 750кН$; 3 - $P_{max} = 1000кН$.

Начальная температура штампов принималась равной $300^{\circ}C$; температура нагрева заготовки – $1150^{\circ}C$. В расчетах приняты кривые температурного и скоростного упрочнения для стали 20ХГНМ, полученные путем аппроксимации экспериментальных данных.

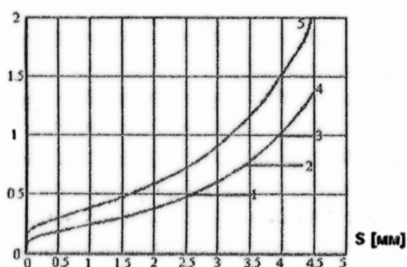
Используя программный продукт, поставлена и решена задача, в которой моделируется работа гидравлического пресса с гидромоторами на станине с индивидуальным насосным приводом. Рабочая жидкость подается с постоянной производительностью отдельно в гидроцилиндр и гидромоторы, в результате чего плунжер гидроцилиндра получает линейную скорость $v = 5 \frac{мм}{с}$, а

Пресс может работать также без ограничения силы деформирования как с кручением, так и без кручения.

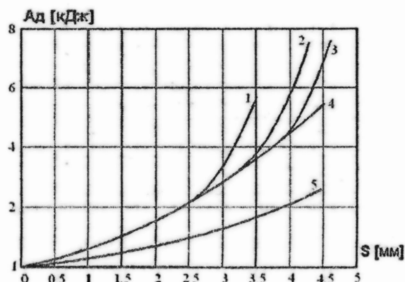
На рисунке 20 изображены графики изменения силы P_T [МН] и работы деформации A_d [кДж] в зависимости от перемещения ползуна S [мм], из которых следует, что пластическая деформация (осадка заготовки) происходит при постоянном значении технологической силы. Максимальная технологическая сила $P_{\max} = 500$ кН достигается при осадке заготовки на 2,6 мм; под действием постоянной силы $P_{\max} = 500$ кН и вращения осадочной плиты заготовка осаживается на 0,9 мм. Для других режимов работы прессы эти цифры составляют: для $P_{\max} = 750$ кН соответственно 3,4 мм и 0,8 мм, для $P_{\max} = 1000$ кН - 4,0 мм и 0,5 мм. Без ограничения максимальной силы заготовка осаживается на 4,5 мм, при этом максимальная сила составляет $P_{\max} = 1375$ кН. Без кручения для осадки на 3,5 мм, 4,2 мм и 4,5 мм сила осадки более чем в 2 раза превышает $P_{\max}$ с кручением (рис. 20,а).

Анализ энергетических затрат при осадке с кручением показывает (рис. 20,б), что минимальное значение работы деформирования (2,6 кДж) имеет место при осадке поступательно перемещающимся инструментом. Вращение инструмента увеличивает работу в 2,2 раза (5,7 кДж) в режиме 1. В режимах 2, 3 работа увеличивается в 3 раза. При осадке без ограничения силы деформирования работа увеличивается в 2,1 раза (5,5 кДж). Данные результаты показывают, что кручение приводит к существенному увеличению энергозатрат на формоизменение заготовки. Важно отметить, что работа в режиме без ограничения силы имеет меньшее значение, чем в режимах с ограничением силы, что подтверждает данные теоретических исследований.

P_T [МН]



а)



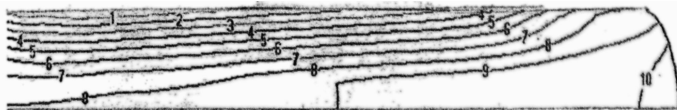
б)

Рис. 20. Зависимости параметров: P_T – силы деформирования (а) и A_d – работы деформирования (б) от хода инструмента S : 1 – $P_{\max} = 500$ кН; 2 – $P_{\max} = 750$ кН; 3 – $P_{\max} = 1000$ кН; 4 – без ограничения силы деформации; 5 – осадка без кручения

Программный комплекс «Kручение» позволяет исследовать тепловой режим штамповки с кручением. В процессе формоизменения заготовки одновременно происходят процессы как теплопередачи от нагретой

заготовки в инструмент, так и тепловыделения, связанного с тепловым эффектом при пластических деформациях и с превращением сил контактного трения в теплоту. На рис. 21 показано распределение температуры по сечению осаженной заготовки с начальной температурой $t = 1150^{\circ}\text{C}$.

Наименьшая температура 969° в центре заготовки на контакте с осадочной плитой (изолиния 1) ниже первоначальной температуры на 181° . Наибольшая температура на периферии осаживаемого образца по горизонтальной оси симметрии – 1198° (изолиния 10). Температура этой изолинии на 48° превышает исходную температуру заготовки (1150°), что связано с тепловым эффектом. Наибольший перепад температур по сечению осаженного образца колеблется в пределах 224°C (для всех режимов).



Изолинии	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t, ^{\circ}\text{C}$	999	1020	1041	1063	1084	1105	1126	1147	1168	1189

Рис. 21. Изолинии распределения температуры по сечению заготовки

В седьмом разделе изложены результаты экспериментальных исследований и промышленного освоения прессов для штамповки методом осадки с кручением. Экспериментальное оборудование было создано на базе гидравлического пресса модели ДБ-2432 силой 1,6 МН (рис. 22) для проведения комплексных исследований осадки с кручением на цилиндрических образцах из свинца и алюминиевых сплавов с замером сил и моментов и для сравнения теоретических и экспериментальных данных.

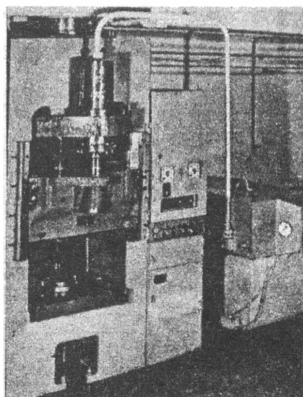


Рис. 22. Лабораторная гидравлическая установка силой 1,6 МН для штамповки с кручением

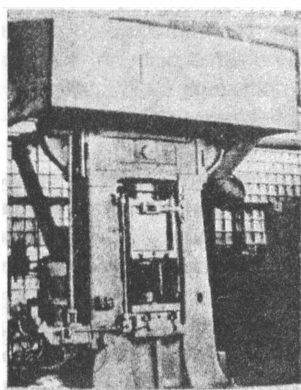
Наибольшее расхождение результатов расчета и эксперимента не превышает 23% для всех условий проведения экспериментов.

Конструктивная схема винтового пресса с жесткой связью кинематических параметров положена в основу модернизации винтового фрикционного пресса модели Ф127 силой 2,5 МН (рис. 23, а), установленного на Полтавском алмазном заводе и предназначенного для изготовления плоских и конических корпусов алмазного инструмента.

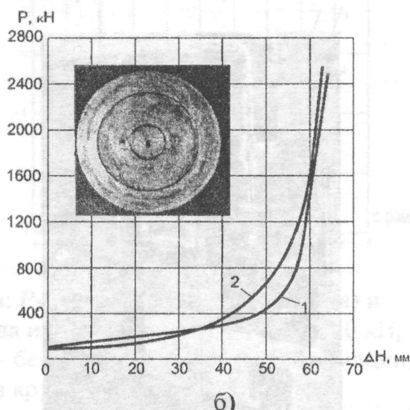
На рис. 23,б показаны результаты экспериментальных исследований штамповки с кручением типовой детали.

Модернизация такого же пресса по схеме винтового пресса с инерционным механизмом вращения (рис. 24, а) выполнена на Винницком инструментальном заводе для штамповки с кручением дисковых фрез из стали Р6М5 диаметром 50 мм и 63 мм (рис. 24, б). Новая технология позволила повысить КИМ с 0,3 до 0,6 и снизить балл карбидной неоднородности с 6 – 7 до 2 – 3, что повысило стойкость штампованных фрез в 1,5 – 2 раза. На этом прессе проведены комплексные исследования возможности изготовления деталей из стружковых отходов металлообработки углеродистых и инструментальных сталей. На рис. 24, в показан внешний вид поковки автомобиля ЗИЛ «шайба коленвала», изготовленной из стружковых брикетов (материал – сталь 45). Проведенные испытания показали, что материал деталей имеет удовлетворительную обрабатываемость резанием и износостойкость, а статическая прочность у них выше, чем у серийных. Изготовленные детали рекомендованы в эксплуатацию.

Воронежским ПО ТМП изготовлен специализированный КГШП с вращающимся штамподержателем модели К04.196.840 силой 10 МН, внешний вид которого представлен на рис. 25, а. Для определения технологических возможностей пресса и силового нагружения исполнительных механизмов проведены стендовые испытания пресса под нагрузкой путем осадки заготовок на плоских плитах и двухпереходной штамповки тонкостенных поковок. Заготовки из стали 45 диаметром 60 мм различной высоты h осаживались до размеров дисков: диаметр $D = 180 - 210$ мм, высота $H = 7 - 11,6$ мм. По сравнению с традиционной осадкой сила при осадке с кручением снижена в 1,63 раза (расчетная) и в 1,5 раза (экспериментальная).



а)



б)

Рис. 23. Внешний вид модернизированного винтового фрикционного пресса Ф127 силой 2,5 МН (а) и графики силы штамповки (б) поковки «корпус алмазного круга» в зависимости от хода ползуна : 1 – эксперимент; 2 – расчет

Штамповка поковок «каретка синхронизатора» из стали 18ХГТ осуществлялась в два перехода: осадка заготовок $d = 70$ мм; $h = 110$ мм до высоты $H = 40$ мм и диаметра $D = 116$ мм на плоских плитах без кручения и окончательная штамповка вращающимся инструментом. Поковки, графики сил штамповки которых представлены на рис. 25, б, имеют облой толщиной 2,5 мм и шириной 7,5 мм. Наибольшая сила штамповки этих поковок составляет 8,75 МН, это несколько меньше расчётной (9,8 МН). При штамповке такой поковки поступательно перемещающимся инструментом сила штамповки составляет $P = 24,5$ МН, что в 2,8 раза больше, чем при штамповке с кручением.

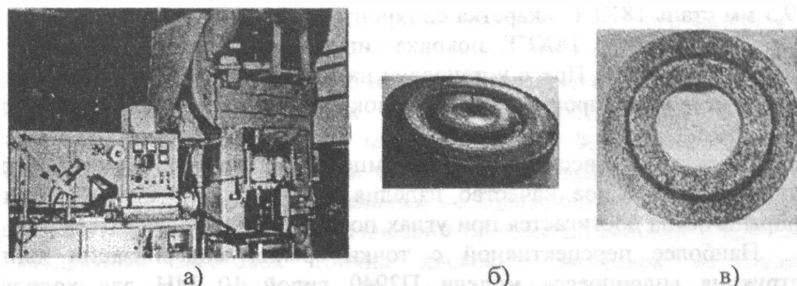


Рис. 24. Внешний вид участка штамповки фрез (а) и поковок фрезы из стали Р6М5 (б) и «шайба коленвала» из стружковой заготовки (в)

Для производства крупногабаритных поковок потребовалось создание базового образца специализированного гидравлического пресса с вращающимся штамподержателем. Исходными данными для проектирования такого пресса послужили экспериментальные исследования штамповки с кручением на лабораторном прессе и номенклатура поковок станкостроительных заводов, на основе которых Коломенским СПО спроектирован, изготовлен и сдан в эксплуатацию гидравлический пресс с вращающимся штамподержателем модели ПО941 силой 12,5 МН (рис. 26, а).

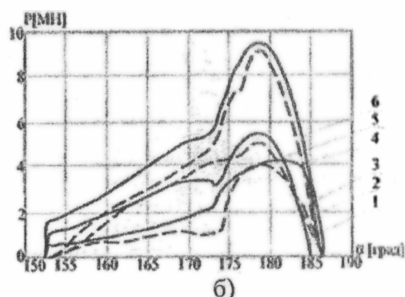
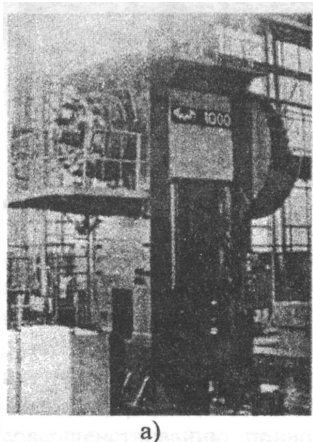
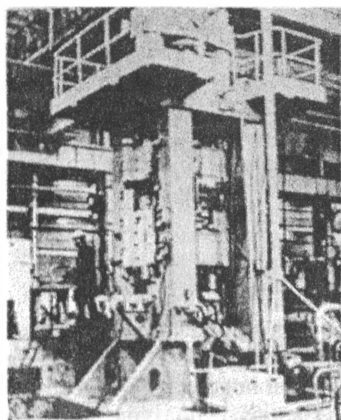


Рис. 25. Внешний вид кривошипного пресса КО4.196.840 и графики силового нагружения при штамповке типовой поковки: 1, 4 – наружного; 2, 5 – внутреннего ползуна; 3, 6 – суммарная сила. Эксперимент - - -; расчет —

Испытания пресса проводились на сборочном стенде завода: Начальные эксперименты осуществлялись без осциллографирования для оценки предельных величин диаметров и толщин поковок и определения тем самым технологических возможностей пресса. Осадке с кручением подвергались заготовки различной массы из сталей 45, 40Х, 18ХГТ, нагретые до температуры 1200 – 1250°С. Сначала осадка осуществлялась без кручения силой нижнего гидроцилиндра до видимой остановки нижнего ползуна, а затем силой верхнего гидроцилиндра до видимой остановки верхней подвижной поперечины. На рис. 26, б показаны образцы, полученные на прессе ПО941: плоские диски $D = 340$ мм, $h = 10$ мм сталь 45, $D = 265$ мм, $h = 9,5$ мм сталь 18ХГТ; «каретка синхронизатора» автомобиля ЗИЛ $D = 210$ мм; $h = 12$ мм сталь 18ХГТ; поковка типа «диск с ободом» $D = 300$ мм; $h = 18$ мм сталь 40Х. Пресс установлен на Краснодарском станкозаводе им. Седина, где освоено производство поковок шестерен с наружным диаметром 220 – 260 мм.

Лабораторные исследования штамповки некоторого класса поковок показали, что высокое качество изделия и полное заполнение металлом гравюры штампа достигается при углах поворота штамподержателя от 2π до 6π . Наиболее перспективной с точки зрения модернизации явилась конструкция гидропресса модели П2940 силой 10 МН для холодного выдавливания Одесского ПО "Прессмаш". Пресс содержит малогабаритную цельнолитую жесткую станину и компактный гидропривод. Гидроцилиндром служит основание пресса, а его плунжер – ползуном. На верхней части станины установлены высокомоментные гидромоторы. На модернизированном прессе мод. К25.240.01, внешний вид которого представлен на рис. 27, а, освоено производство корпусов алмазных кругов диаметром свыше 220 мм из алюминиевого сплава АК-6 и проведены исследования технологических процессов штамповки с кручением изделий из цветных и жаропрочных сплавов.



а)



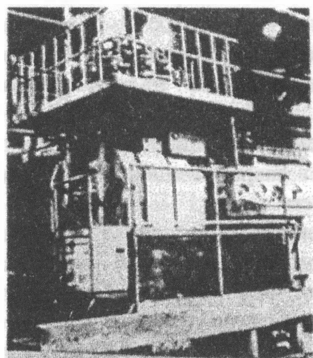
б)

Рис. 26. Внешний вид гидравлического пресса модели ПО941 (а) и поковок, полученных на этом прессе (б)

Основные недостатки существующей технологии штамповки изделий типа «конус» заключаются в повышенном расходе металла ($KИМ=0,34$), необходимости нагревать заготовку до высокой температуры, что в сочетании с малой степенью деформации приводит к крупнозернистому строению материала изделия, а также в большом количестве переходов. По разработанной технологии производится формовка заготовки на первом переходе и окончательная штамповка с кручением на втором переходе. Новая технология улучшает качество изделия, сокращает количество переходов штамповки и повышает $KИМ$ с 0,34 до 0,57.

В целях экономии дорогостоящих цветных металлов принято при изготовлении тонких дисков осуществлять раскрой исходного материала на квадратные заготовки. Однако при последующей штамповке таких заготовок возникают трудности, связанные с высокими технологическими нагрузками. Кроме того, во всех случаях изделия полностью не оформлены, разнотолщинность достигает 0,5 мм (по чертежу 0,2 мм), размер зерна заметно снижает эксплуатационные свойства ряда изделий.

На основании экспериментальных исследований определены режимы штамповки и разработан технологический процесс штамповки с кручением из квадратных заготовок тонких дисковых заготовок из меди и алюминиевого сплава АМ – 2М, обеспечивающий достижения необходимой точности изделий и размера зерна.



а) Рис. 27. Внешний вид гидравлического пресса модели К25.240.01

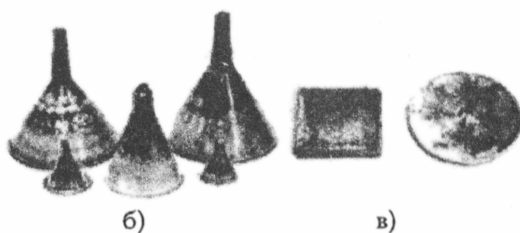


Рис. 27. Внешний вид гидравлического пресса модели К25.240.01 (а) и изделий «конус» (б) и «диск» (в), материал медь М1

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработанные и освоенные в производстве технологические процессы штамповки на прессах с вращающимся штамподержателем осесимметричных поковок позволяют снизить силу деформирования в 2 – 3 раза, осуществлять штамповку в закрытых штампах, повысить стойкость инструмента.

2. Предложенные научно обоснованные технические решения по совершенствованию привода винтовых прессов, а именно разработанный

новый двухмаховичный электромагнитный привод винтовых прессов отличается простотой конструкции и обеспечивает оптимальный режим работы приводного электродвигателя.

3. Разработанные на базе теоретических исследований динамические модели работы прессов, в которых взаимосвязаны технологические параметры штамповки и параметры механической системы, учитывающие реальный характер нагружения деталей и узлов пресса, позволили имитировать работу прессов в режимах автоматических холостых и рабочих ходов, определять для любого момента времени кинематические, силовые и энергетические характеристики пресса, протекание процесса штамповки в условиях упругой деформации прессов.

5. В результате исследований выявлены оптимальные параметры механической системы прессов, обеспечивающие наиболее экономичные показатели проектируемого оборудования и технологического процесса.

6. Разработанная программа, моделирующая упругие деформации пресса, которые влияют на кинематику штамповки, позволила получить уточненные силовые параметры штамповки. Методика учета жесткости пресса дала возможность выполнить анализ периода разгрузки пресса после окончания штамповки.

7. Выполненное в диссертации сравнение результатов математического моделирования процессов штамповки методом осадки с кручением на прессах с вращающимся штамподержателем с экспериментальными данными, полученными при испытании опытных образцов специализированных прессов, показало их хорошее совпадение, что позволило рекомендовать разработанную методику для практического применения.

8. В результате промышленного освоения специализированных винтовых, кривошипных и гидравлических прессов разработаны и приняты в производство следующие технологические процессы:

- технологический процесс штамповки поковок корпусов алмазных кругов из алюминиевого сплава АК-6 диаметром до 220 мм на гидравлическом прессе силой 10 МН, в результате чего получена экономия металла и снижена трудоемкость механической обработки;

- технологический процесс штамповки фрез из стали Р6М5 на модернизированном винтовом прессе силой 2,5 МН и деревообрабатывающих фрез диаметром до 300 мм на гидравлическом прессе модели П0941 силой 12,5 МН, что повысило качество и стойкость фрез;

- технологические процессы штамповки деталей типа конус из меди, позволяющие решать принципиально важные задачи получения методом объемной штамповки особо тонкостенных деталей с отношением характерных размеров свыше 50, при этом достигается снижение расхода металла, получение мелкодисперсной структуры с баллом зерна 14, устраняется необходимость обработки внутренней поверхности, в результате существенно возрастают эксплуатационные свойства изделий;

– технологические процессы штамповки поковок из стальной стружки, механические свойства материала которых находятся на уровне и даже превосходят механические свойства аналогичного компактного материала.

ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ

1. Приближенное решение задачи сжатия с одновременным кручением тонкого слоя / О.А. Ганаго, В.Н. Субич, Б.А. Степанов [и др.] // Известия вузов. Машиностроение. 1978. № 2. С. 140–144.
2. Оптимизация энергосиловых параметров при осадке тонкого слоя / О.А. Ганаго, В.Н. Субич, Б.А. Степанов [и др.] // Известия вузов. Машиностроение. 1978. № 10. С. 42–44.
3. Субич В.Н., Степанов Б.А. Приближенные решения осесимметричной задачи // Известия вузов. Машиностроение. 1978. № 3. С. 31–33.
4. Исследование процесса осадки с кручением тонкого слоя / В.Н. Субич, Б.А. Степанов [и др.] // Известия вузов. Машиностроение. 1980. № 6. С. 26–27.
5. Штамповка поковок тонкостенных дисков осадкой вращающимся инструментом / О.А. Ганаго, В.Н. Субич, Б.А. Степанов [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. 1981. № 6. С. 14–16.
6. Ганаго О.А., Степанов Б.А., Субич В.Н. Пластическое течение тонкого слоя при сжатии с одновременным сдвигом // Известия вузов. Машиностроение. 1981. № 1. С. 9–11.
7. Ганаго О.А., Степанов Б.А., Момзиков Ю.Г. Штамповка поковок шестерен в закрытом штампе с использованием сил трения // Кузнечно-штамповочное производство. 1981. № 6. С. 31–32.
8. Субич В.Н., Степанов Б.А., Арчаков А.Т. Исследование силовых параметров и деформированного состояния при осадке с кручением // Технологии легких сплавов. 1983. № 9. С. 27–30.
9. Субич В.Н., Степанов Б.А., Арчаков А.Т. Штамповка методом осадки с кручением на гидравлическом прессе // Автомобильная промышленность. 1985. № 12. С. 29–30.
10. Степанов Б.А., Субич В.Н. Исследование штамповки методом осадки с кручением на модернизированном гидравлическом прессе // Кузнечно-штамповочное производство. 1986. № 9. С. 30–32.
11. Субич В.Н., Степанов Б.А., Горожанкин В.Н. Кривошипный горячештамповочный пресс с вращающимся инструментом // Кузнечно-штамповочное производство. 1989. № 8. С. 18–20.
12. Степанов Б.А., Субич В.Н., Максименко А.Е. Изготовление осесимметричных поковок штамповкой с кручением // Кузнечно-штамповочное производство. 1995. № 2. С. 19–21.
13. Степанов Б.А. Электромагнитный привод винтового пресса с фрикционным соединением винта с маховиком // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 3. С. 476 – 483.

14. Степанов Б.А. Оптимизация конструктивных параметров кривошипных прессов с вращающимся штамподержателем // Кузнечно-штамповочное производство. ОМД. 2012. № 3. С. 24–28.
15. Степанов Б.А. Винтовой пресс с двухмаховичным электромагнитным приводом // Кузнечно-штамповочное производство. ОМД. 2012. № 2. С. 29–34.
16. Степанов Б.А. Специализированное оборудование для штамповки осесимметричных крупногабаритных поковок // Технология металлов. 2012. № 1. С. 41–46.
17. Степанов Б.А. Применение специализированных горяче-штамповочных прессов для производства осесимметричных поковок // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 12. С. 19–20.
18. Степанов Б.А. Оптимизация конструктивных параметров винтовых прессов с инерционным механизмом вращения инструмента // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 12. С. 18–21.
19. Исследование силовых и энергетических параметров осадки с кручением / О.А. Ганаго, В.Н. Субич, Б.А. Степанов [и др.] // ОМД в автомобилестроении: межвузовский сборник научных трудов. – М.: МАМИ. 1978. Вып.1. С. 54–57.
20. Совершенствование конструкций винтовых прессов с вращающимся инструментом / Б.А. Степанов [и др.] // ОМД в автомобилестроении: межвузовский сборник научных трудов. – М.: МАМИ. 1980. Вып.1. С. 144–151.
21. Субич В.Н., Степанов Б.А., Арчаков А.Т. Влияние жесткости кривошипных прессов на технологические параметры штамповки с кручением // Машины и автоматизация КШП: межвузовский сборник научных трудов. – М.: ВЗМИ. 1988. Вып.1. С. 21–23.
22. Степанов Б.А., Лебедь А.Д., Силаев А.И. Технологическая эффективность винтовых прессов с инерционным механизмом // Процессы ОМД в автомобилестроении: межвузовский сборник научных трудов. – М.: МАМИ. 1988. Вып.1. С. 39–41.
23. Степанов Б.А., Субич В.Н. Изготовление поковок из стальной стружки // Совершенствование кузнечно-штамповочного производства: сборник научных трудов. – М.: НИИТ. 1992. С. 53–57.
24. Степанов Б.А., Максименко А.Е., Субич В.Н. Кинематические исследования специальных кривошипных прессов с вращающимся инструментом // Техника, технология и перспективные материалы: межвузовский сборник научных трудов. – М.: МАСИ, 1995. Т.1. С. 64–67.
25. Степанов Б.А. Математическое моделирование штамповки с кручением на специализированном гидравлическом прессе с вращающимся штамподержателем // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. Украина. Краматорск. ДГМА. 2012. № 1. С. 267–270.
26. Степанов Б.А., Максименко А.Е., Субич В.Н. Определение кинематических и энергосиловых параметров штамповки типовой поковки на прессе К0940 с помощью математического моделирования // Техника, технология и перспективные материалы: межвузовский сборник научных трудов. М.: МГИУ, 1996. Т.1. С. 22–23.

27. Степанов Б.А., Тимохин В.С. Оптимизация параметров привода винтовых фрикционных прессов // Техника, технология и перспективные материалы: межвузовский сборник научных трудов. – М.: МГИУ. 1999. Т.1. С. 43–45.

28. Степанов Б.А., Тимохин В.С. Математическое моделирование винтовых прессов с вращающимся штамподержателем // Техника, технология и перспективные материалы: межвузовский сборник научных трудов. – М.: МГИУ, 2000. Т. 1. С. 44–47.

29. Степанов Б.А., Максименко А.Е. Перспективы использования КГПП с вращающимся ползуном // Техника, технология и перспективные материалы: межвузовский сборник научных трудов. – М.: МГИУ, 2000. Т.3. С. 49–51.

30. Степанов Б.А., Тимохин В.С. Оптимизация конструктивных параметров двухмаховичного электромагнитного привода винтовых прессов // Техника, технология и перспективные материалы: межвузовский сборник научных трудов. – М.: МГИУ, 2003. Т.1. С. 68–71.

31. Степанов Б.А., Тимохин В.С. Оптимизация параметров фрикционного привода винтовых прессов // Техника, технология и перспективные материалы: межвузовский сборник научных трудов. – М.: МГИУ, 2004. Т.2. С. 60–63.

32. Степанов Б.А., Тимохин В.С., Авдеев А.С. Моделирование двухмаховичного фрикционного привода винтовых прессов // Машиностроение и инженерное образование. – М.: МГИУ, 2005. № 3. С. 71–73.

33. Степанов Б.А. Исследование исполнительных механизмов кривошипных прессов с вращающимся штамподержателем // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. Украина. Краматорск. ДГМА. 2011. № 1(26). С. 203–208.

34. Степанов Б.А. Математическое моделирование штамповки с кручением на специализированном гидравлическом прессе с вращающимся штамподержателем // Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов. Украина. Краматорск. ДГМА. 2012. № 1. С. 267 – 270.

35. Степанов Б.А. Технологическая эффективность специализированных гидравлических прессов с вращающимся штамподержателем // MATERIALLY VIII MEZINARODNI VEDEKO PRAKTICA KONFERENCE. Praha. 2012. С. 26–28.

36. А.с. 871865 СССР. Штампы для объемной штамповки / Б.А. Степанов, О.А. Ганаго, В.Н. Субич и др. // Б.И. 1981. № 38.

37. А.с. 916341 СССР. Гидравлический пресс / Б.А. Степанов, О.А. Ганаго, В.Н. Субич и др. // Б.И. 1982. № 12.

38. А.с. 986052 СССР. Кривошипный пресс / Б.А. Степанов, О.А. Ганаго, В.Н. Субич и др. 1983. ДСП.

39. А.с. 1007306 СССР. Винтовой пресс / О.А. Ганаго, Н.В. Холмогоров, Б.А. Степанов и др. 1984. ДСП.

40. А.с. 1110062 СССР. Кривошипный пресс / Б.А. Степанов, О.А. Ганаго, В.А. Волон и др. 1984. ДСП.

41. А.с. 1194688 СССР. Гидравлический пресс для штамповки с кручением / О.А. Ганаго, Б.А. Степанов, А.В. Сафонов и др. // Б.И. 1985. № 44.
42. А.с. 1232499 СССР. Гидравлический пресс / О.А. Ганаго, А.В. Сафонов, Б.А. Степанов и др. // Б.И. 1986. № 19.
43. А.с. 1234214 СССР. Гидравлический пресс / О.А. Ганаго, Н.А. Лобанов, Б.А. Степанов и др. // Б.И. 1986. № 20.
44. А.с. 1247147 СССР. Штмп для штамповки с кручением / В.Н. Субич, Б.А. Степанов, О.А. Ганаго и др. // Б.И. 1986. № 28.
45. А.с. 1249816 СССР. Винтовой пресс / В.Н. Субич, Б.А. Степанов, А.Т. Арчаков и др. // Б.И. 1986. № 31.
46. А.с. 1276521 СССР. Кривошипный пресс для штамповки с кручением / О.А. Ганаго, А.М. Гришков, Б.А. Степанов и др. // Б.И. 1986. № 46.
47. А.с. 1297361 СССР. Гидравлический пресс / Г.Н. Руин, В.Д. Резницкий, Б.А. Степанов и др. 1987. ДСП.
48. А.с. 1305965 СССР. Способ осадки / В.Н. Субич, Б.А. Степанов, О.А. Ганаго и др. ДСП.
49. А.с. 1368192 СССР. Кривошипный пресс для штамповки с кручением / О.А. Ганаго, А.А. Боков, Б.А. Степанов и др. // Б.И. 1988. № 3.
50. А.с. 1431217 СССР. Механический пресс для штамповки с кручением / О.А. Ганаго, Б.А. Степанов, В.Н. Субич и др. ДСП.
51. А.с. 1433829 СССР. Винтовой пресс для штамповки с кручением / Б.А. Степанов, О.А. Ганаго, В.Н. Субич и др. // Б.И. 1988. № 40.
52. А.с. 1451049 СССР. Гидравлический пресс для штамповки с кручением / Б.А. Степанов, О.А. Ганаго, В.Н. Субич и др. // Б.И. 1989. № 2.
53. А.с. 1721971 СССР. Винтовой пресс для штамповки с кручением / Б.А. Степанов, А.В. Сафонов, В.Н. Субич и др. ДСП.
54. А.с. 228664 СССР / А.Н. Капустин, Б.А. Круглов, Б.А. Степанов и др. ДСП.
55. Патент № 2193969 (РФ). Пресс / Б.А. Степанов, В.А. Демин, В.С. Тимохин // Б.И. 2002. № 34.
56. Патент № 2193970 (РФ). Винтовой пресс / Б.А. Степанов, В.А. Демин, В.С. Тимохин // Б.И. 2002. № 34.
57. Патент № 2193971 (РФ). Винтовой пресс / Б.А. Степанов, В.А. Демин, В.С. Тимохин // Б.И. 2002. № 34.
58. United States Patent 4.603.573. Press / О.А. Ganago, A.V. Safonov, B.A. Stepanov. 1986.
59. United States Patent 4.559.807. Press / О.А. Ganago, A.V. Safonov, B.A. Stepanov. 1986.
60. Konungariket Sverige Patent 8303671–5. Press med vridbart anordnad stansverktygshallare./ О.А. Ganago, A.V. Safonov, B.A. Stepanov. 1985.
61. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программный комплекс «Kручение» / А.В. Власов, Н.А. Шестаков, В.Н. Субич, Б.А. Степанов. № 2012614648. 2012.