

## РЕФЕРАТ

ПО ИСТОРИИ \_\_\_\_\_ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК \_\_\_\_\_ НА ТЕМУ

Наименование наук, по которым проходит подготовку аспирант

### ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ И МЕТОДОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Реферат выполнил:

**Пикалов Антон  
Александрович  
аспирант**

Ф.И.О. аспиранта или соискателя

Реферат проверил:

**Дубровский Павел  
Валерьевич  
к.т.н., доцент кафедры  
инженерной физики**

Ф.И.О., ученая степень и ученое звание

преподавателя по истории науки

*31.07.16*

Ульяновск, 2016 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ .....	9
1.1.Зарождение механической обработки материалов .....	9
1.2.Развитие технологии и оборудования механической обработки .....	12
1.3.Опережающее развитие машиностроения и механообработки .....	18
2. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ .....	21
2.1.Современные методы механической обработки .....	21
2.2.Проблемы механической обработки современных авиационных конструкций.....	22
2.3.Особенности механической обработки смешанных пакетов.....	26
ПОСЛЕСЛОВИЕ .....	33

## ВВЕДЕНИЕ

"Кто знает, тот может. Только бы узнать, и крылья будут". **Леонардо да Винчи** [10].

Перспективы развития летательных аппаратов требуют совершенствования и разработки новых, более эффективных типов авиационных конструкций, материалов и технологий их производства и обработки. Данный процесс чрезвычайно сложен по своей природе, а его движущие силы и механизмы часто глубоко скрыты под поверхностью социально-политических, экономических и технических последствий, вызванных некоторой инновацией [12].

Изучение истории науки и техники, а именно технических разработок прошлого на всех этапах инженерной деятельности может послужить основой для новых современных разработок. Это необходимо для того, чтобы при создании чего-либо нового максимально использовать опыт и знания, накопленные предыдущими поколениями ученых, инженеров, изобретателей. Так, как правило, при создании новых изобретений используется метод аналогов и прототипов – получение нового технического решения на базе совокупности имеющихся к этому моменту знаний или за счет усовершенствования разработанных ранее конструкций, методов и др. Такого же мнения придерживался и великий Леонардо да Винчи, который считал, что создавать новое можно, лишь изучив весь предшествующий опыт, добавив к тому же и общие теоретические закономерности.

Знание истории науки и техники не только расширяет интеллектуальный кругозор, но и имеет большое практическое значение особенно для будущих специалистов. Многообразие технических решений в процессе создания той или иной машины стимулирует творческую активность инженеров, экономит силы и время, способствует тому, чтобы не изобретать того, что было известно раньше. Ранее изобретенное в свое время могло не найти практического применения по разным причинам: прежде всего, из-за отсутствия потребности или неподготовленности государства или общества, отсутствия конструкционных или эксплуатационных материалов и т.п.

В современном определении, **техника** (от греч. **techne** – искусство, мастерство) – это совокупность средств человеческой деятельности, созданных для осуществления процессов производства и обслуживания непрямых потребностей общества. В ней материализованы знания и производственный опыт, накопленные человечеством в процессе развития общественного производства. В более узком и собирательном смысле под техникой подразумеваются машины, механизмы, приборы, устройства, орудия той или иной отрасли производства. Часто в понятие техники и в объекты технических наук включается также понятие технологии. **Технология** (от гр. **techne** + **logos** – слово, учение) – совокупность производственных процессов в определенной отрасли производства, а также описание способов производства. Техника и технология неразрывно связаны друг с другом, и на эти два понятия опирается любое производство.

Объектом истории техники является в первую очередь сама техника, поэтому ее можно определить как науку, изучающую закономерности развития техники в условиях различных общественно-экономических формаций. Изучая структуру и свойства техники, история техники носит характер технической науки, а изучая развитие техники и исследуя влияние общественных условий на ее развитие, она носит характер общественной науки – в этом состоит **дуализм истории техники как науки** [21].

Техническая деятельность человека не является изолированной и узкоспециализированной, т.к. при разработке любых объектов техники необходимо учитывать целый ряд не только технических, но и экономических, экологических, эстетических и иных социальных требований, определяемых той областью материального производства, где техника создается, и той сферой общественной жизни, где она используется. Техническая деятельность возникла на самых ранних этапах становления человеческого общества. Создание техники является результатом решения какой-то вполне конкретной технической задачи.

В первобытном обществе в силу перемены видов труда техническая деятельность еще не имела самостоятельности, которую она стала приобретать в период отдаления ремесел от земледелия и скотоводства, когда стал формироваться основной субъект технической деятельности – ремесленник. По мере перехода к классовому обществу и цивилизации, дифференциации и интеграции труда происходили дальнейшее развитие технической деятельности и появление зачатков инженерной деятельности.

Развитие мануфактуры привело к возникновению новых форм технической деятельности, субъектами которой наряду с ремесленниками становились и работники мануфактур. Одновременно быстрыми темпами шло формирование технических наук и инженерной деятельности.

Промышленная революция окончательно закрепила в качестве основного субъекта технической деятельности наемного промышленного рабочего. В эпоху наступления научно-технической революции с развитием технических наук и высшего технического образования, обусловивших появление новых форм технической деятельности, ее основными субъектами становятся инженер и рабочий.

Термин **инженер** (фр. **ingenieur** от лат. **ingenium** – ум, изобретательность, врожденные способности) появился и получил большое распространение в Западной Европе в XIII-XIV вв. В XVII в. через французский и немецкий языки это слово проникло и в Россию. История инженерной деятельности тесно связана с историей цивилизации и закономерностями развития техники, достижения которых в значительной степени были обеспечены трудом и творчеством этой категории технических работников.

В становлении инженерной деятельности можно выделить пять этапов:

**Первый (прединженерный) этап** был этапом становления инженерной деятельности в эпоху рабовладельчества, связанным главным образом со строительством и архитектурой.

Развитие производства и рост городов стимулировали активизацию научных знаний и развитие математики, минералогии, астрономии, медицины и других естественных и точных наук. Для возведения гигантских пирамид, Великой китайской стены и других сооружений древности требовались, прежде всего, точные математические расчеты и хорошее знание механики.

Научные знания того времени носили недифференцированный характер, поэтому труды великих ученых древности были энциклопедическими и порой сложно определить их научную специализацию. Древняя наука, несмотря на наличие отдельных гениальных открытий, была отрывочна, умозрительна, внутренне противоречива и оторвана от производства – она переживала свой «донаучный» этап.

Не было науки в ее нынешнем понимании в древней культуре Китая, Египте, Риме, Греции и других оазисах античности. Соответственно не было систематичной подпитки



практики, а были лишь эпизодические вспышки блестящих догадок, так и не сложившиеся в единый организм науки. Хотя отдельные явления, характерные для процесса становления наук о природе, могли наблюдаться и в рассматриваемый период.

Так на рубеже 4-3-го тысячелетий до н. э. появилось десятичное счисление, а к концу указанного периода – первые десятичные символы. Математика развивалась, прежде всего, за счет арифметики, необходимой для различного вида хозяйственных расчетов и геометрии – для земледелия.

Первым научным трудом по математике была «Арифметика», опубликованная в Китае во 2 в. до н. э. Но особенных высот в то время достигла наука Древней Греции, где сложились замечательные **натурфилософские школы**, пытавшиеся объяснить многие природные явления. Центром прикладной науки стала Александрийская школа, выходцами из которой были такие выдающиеся механики как Ктесибий, Архимед, Герон Александрийский, Евклид, Пифагор и др. В обществе наметилось разделение между умственным и физическим трудом.

**Ктесибий** был выдающимся изобретателем, который сконструировал двухцилиндровый поршневой пожарный насос (рис. 1), водяные поплавковые часы, водяной орган (гидравлос), аэротрон и другие пневматические и гидравлические приборы.

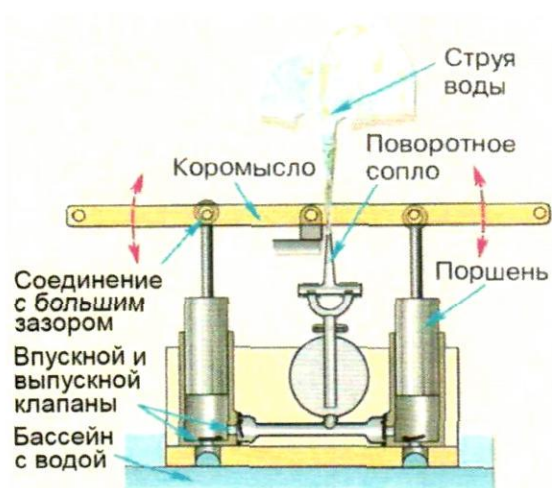


Рисунок 1 - Паровой насос Ктесибия (II-I век до н.э.)

**Архимед** был основоположником теоретической механики и гидростатики. Ему принадлежит первенство во многих открытиях из области точных наук. В физике Архимед ввел понятие центра тяжести, установил научные принципы статики и гидростатики, дал примеры применения математических методов в физических исследованиях. Основные положения статики сформулированы в сочинении «*О равновесии плоских фигур*». В нем Архимед рассматривает сложение параллельных сил, определяет понятие центра тяжести для различных фигур, дает вывод закона рычага. Его научная деятельность была неразрывно связана с изобретательской. Он разработал ряд метательных и грузоподъемных механизмов для защиты его родного города Сиракуз от римлян, изобрел водоподъемный механизм («архимедов винт»), который был применен при осушении залитых Нилом земель, усовершенствовал зубчатое колесо (рис. 2).

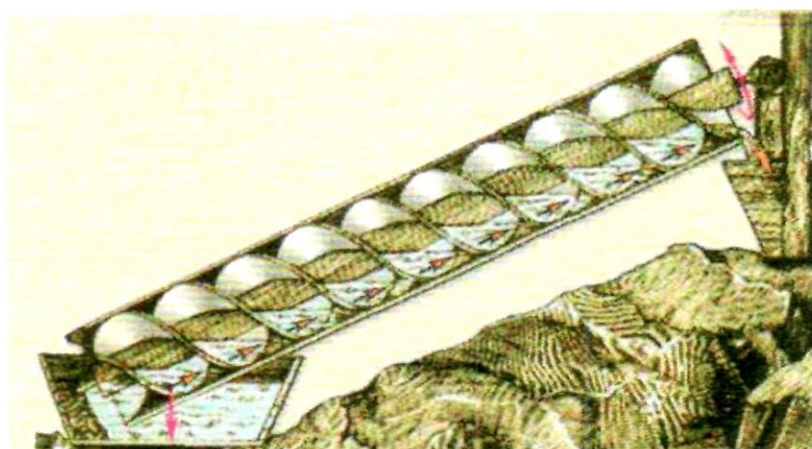


Рисунок 2 – Винт Архимеда

**Герон Александрийский** дал систематическое изложение основных достижений античности в области математики и прикладной механики. Он описал также храповые автоматы, являющиеся прообразом современных автоматов и роботов (рис. 3).



Рисунок 3 - Механизм свободного хода для грузоподъемного устройства

Примечательно понимание механики того времени, изложенное в *«Математическом собрании»* александрийского ученого Паппа: «Из всех искусств, основанных на механике, самым важным в практической жизни являются следующие: искусство мастеров, делающих полиспасты, лиц, строящих катапульты и, наконец, строителей водочерпальных устройств».

**Второй (прединженерный) этап** инженерной деятельности начался в эпоху Возрождения и развивался в условиях феодализма и зарождения машинного производства. Основной сферой инженерной деятельности продолжает оставаться строительство, а также создание военной техники (метательных, стенобойных и др. машин).

Этот этап, связанный с активизацией становления экспериментальной науки и охватывающий значительный исторический период, примерно XV-XVIII вв., считается

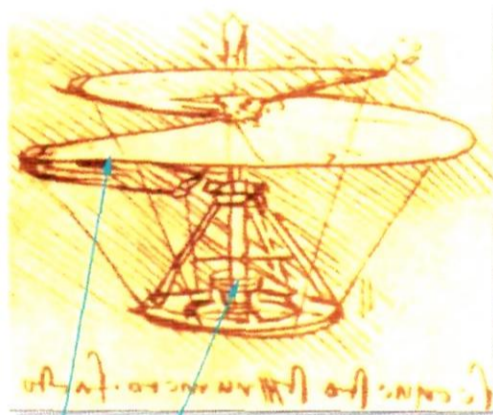


первым, начальным периодом развития современной науки. В течение эпохи Возрождения осуществлялся синтез научно-теоретического мышления и практики, подготавливающий возникновение экспериментального метода.

В IX-XVI вв. в Западной Европе получает широкое распространение алхимия (лат. **alchimia**) – донаучное направление в химии, возникшее в III-IV вв. в Александрии. Все усилия алхимиков были направлены на превращение простых металлов в драгоценные и получения «эликсира долголетия» с помощью несуществующего в природе «философского камня». Пытаясь связать и объяснить реальные факты и наблюдения на основе мистических представлений, алхимия совершила множество ошибок, которые надолго закрепились в умах людей. Но было бы несправедливым считать ее сплошным шарлатанством и надувательством – положительная роль алхимии заключается в том, что в процессе поиска чудодейственного средства были открыты и усовершенствованы способы получения многих практически ценных продуктов (стекло, красок, эмалей, солей, кислот, щелочей, лекарственных препаратов и др.), а также разработаны многие приемы лабораторной техники (перегонка, возгонка и др.). Алхимия ознаменовала собой раннюю, донаучную стадию развития химической науки и оказала сильное влияние на развитие естествознания. На этом пути было сделано и много ценных изобретений и открытий – от пороха до фарфора.

На этом этапе в нарастающем темпе увеличивалось количество изобретений и открытий в западноевропейских странах, формировались квалифицированные технические кадры не только мастеров, но и инженеров – горных, военных, строительных, корабельных и др.

Выдающаяся роль в становлении экспериментальной науки принадлежит, прежде всего, видному основоположнику современного естествознания, гениальному художнику, ученому и инженеру эпохи Возрождения **Леонардо да Винчи**. Кроме увлечения искусством, анатомией, математикой, физикой и механикой он активно занимался исследованиями и конструированием в области техники. Труды этого гения насчитывают около 5 тыс. страниц.



Предусмотрен ручной привод винта

Каркас винта (из "тонких длинных трубок") обтянут крахмаленным полотном.

**Рисунок 4** - Первый прототип вертолета (Рисунок Леонардо Да Винчи, 1505г.)

В своих сочинениях Леонардо да Винчи подробно описал практически все виды зубчатых передач, передач с гибкими звеньями, кулачковых, храповых и винтовых механизмов. Он изобрел несколько типов экскаваторов, несколько гидравлических машин, в том числе тангенциальную турбину; разработал конструкции прядильного, волоочильного, прокатного станков и стана для навивки канатов, а также конструкции токарно-винторезного станка и станка для насечки напильников. К числу его изобретений, намного опередивших свое время, относятся проекты: огнестрельного нарезного оружия, боевой пушечной повозки, вертолета (рис. 4), парашюта и др.

**Агостино Рамелли**, один из преемников Леонардо да Винчи, издал книгу *«Различные искусные машины»*, которая неоднократно переиздавалась. В ней были описаны изобретенные им машины, зачастую весьма сложные по конструкции и насыщенные различными механизмами: мельницы, грузо- и водоподъемники, насосы. К представленным в них механизмам относятся: зубчатые и червячные передачи, кривошипно-шатунные и кулисные механизмы и др.

**Д. Кардано**, один из основоположников кинематики механизмов и разработавший теорию и практику зубчатого зацепления, изобрел механизм, впоследствии названный его именем, получивший широкое распространение в автомобилях.

Настоящий переворот в естествознании вызвал выход в свет в 1543 г. сочинения польского астронома **Н. Коперника** *«Об обращениях небесных сфер»*, в котором была обоснована гелиоцентрическая система мира. Работа была запрещена католической церковью, а его продолжатель **Д. Бруно**, выдвинувший концепцию о бесконечности и бесчисленности миров Вселенной, был обвинен в ереси и сожжен в Риме инквизицией.

Математическое подтверждение «коперниковская астрономия» получила в трудах немецкого астронома **И. Кеплера**. Значительный вклад в утверждение гипотезы множественности обитаемых миров внес и **М.В. Ломоносов**, который, наблюдая за движением планеты Венера, установил на ней наличие атмосферы [19].

**Третий этап** становления инженерной деятельности имел место в эпоху промышленного переворота и распространения рабочих машин на базе парового двигателя.

**Четвертый этап** представлял развитие инженерной деятельности на основе системы машин и технических наук в условиях монополистического капитализма. В середине XIX в. развитие науки, вызванное потребностями материально-технического производства, привело к возникновению социальных институтов технических наук и научно обоснованной технической деятельности, которая с этого времени стала считаться **инженерной**.

С этих пор техническая подготовка производства становится по преимуществу инженерной и, прежде всего, конструкторской и технологической, а инженер – это уже главным образом машиностроитель.

**Пятый этап** – формирование современного инженера в эпоху научно-технической революции. Во второй половине XX в. происходит качественный скачок в развитии социальной функции науки как непосредственной производительной силы. Носителями этой функции становятся инженеры, деятельность которых и является основным каналом превращения науки в непосредственную производительную силу.

По современному определению, инженер – это специалист в какой-либо области техники с высшим техническим образованием. Инженерные разработки поглощают

основную долю затрат при создании новой техники. Современная инженерная деятельность представляет собой форму трудовой деятельности, непосредственно направленную на решение технических задач и создание техники. Техника есть то единое, что объединяет всех инженеров, независимо от того, в какой сфере общественной жизни используется их труд.

**Инженерная деятельность** – это техническое применение науки, направленное на производство техники и удовлетворение общественных технических потребностей. Ее нельзя отождествлять с научной, в том числе и в области технических наук. Если ученый, зачастую, преследует познавательные цели, то перед инженером всегда стоит конкретная практическая задача – создать технический или технологический объект, причем в течение ограниченного промежутка времени и с минимальными затратами. Но по мере развития производства не только существенно меняется техника, но и все более возрастают положение и роль науки, которая все больше сращивается с техникой и становится ведущим фактором. Поэтому, даже при наличии принципиальных различий научной и инженерной деятельности, творчество выдающихся деятелей науки и техники, таких как Архимед, Леонардо да Винчи, М.В. Ломоносов, И.В. Курчатов, С.П. Королев и др., убедительно доказывают неразрывную связь этих двух типов деятельности, необходимость и возможность перемены труда, перехода от научной к инженерной деятельности и наоборот [18].

## 1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

### 1.1. Зарождение механической обработки материалов

Для того чтобы из выплавленного куска металла сделать готовую деталь или законченное изделие ему необходимо придать требуемую форму и обеспечить необходимые механические свойства и качество поверхности. Получение необходимой формы детали или изделия обеспечивается литьем, обработкой давлением и резанием; необходимые механические, физические и технологические свойства металла – термообработкой; требуемое качество поверхности – механической обработкой и нанесением покрытий; получение неразъемных соединений – сваркой, пайкой, клепкой. Все эти современные технологические способы переработки металла в законченные детали и изделия обычно объединяются одним общим термином – **металлообработка**.

Первым, основным видом металлообработки, освоенным человеком еще задолго до наступления эпохи металлов, был **метод обработки резанием**, который первобытный человек стал применять для изготовления изделий из дерева и кости. Этот же принцип формообразования путем снятия стружки был перенесен и на обработку заготовок из металлов, но для этого понадобились более совершенные инструменты и устройства (станки) для обеспечения относительного движения инструмента и заготовки.

При обточке металлических изделий стали широко применяться сверлильные и токарные станки сначала со шнуровым, а с 6 в. до н.э. с лучковым приводом (рис. 5).





Рисунок 5 - Ручной лучковый привод

В предшествующую эпоху они использовались для обработки деревянных и костяных изделий. В 5 в. до н.э. был изобретен токарный станок, который отличался от сверлильного станка с лучковым приводом тем, что во вращение приводилась обрабатываемая деталь. Вначале появились токарные станки с ручным лучковым приводом, затем они были заменены ножными. Вращение в одну сторону (рабочий ход) осуществлялось нажимом ногой на педаль, а в другую (холостой ход) – за счет упругих сил лука, прикрепленного к потолку, или консольной балки (очерпа), вмонтированной в стену (рис. 6).

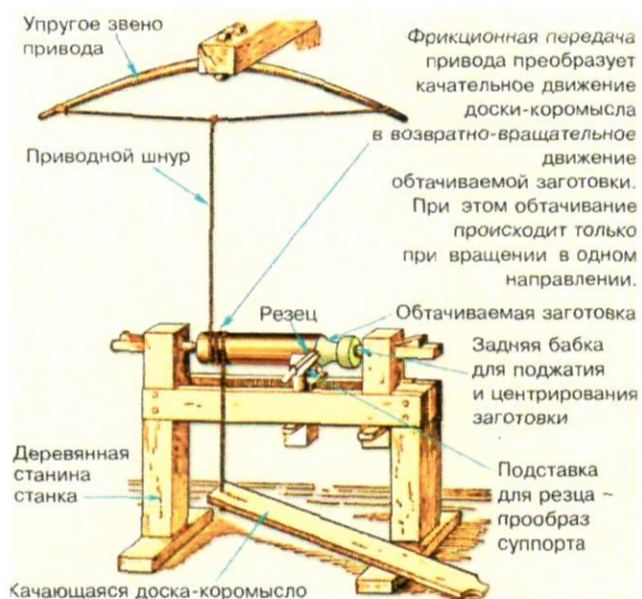
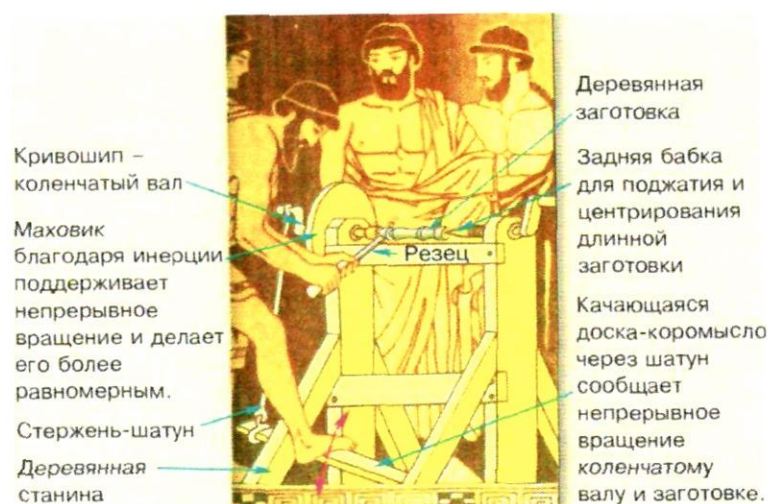


Рисунок 6 - Токарный станок с ножным лучковым приводом

Позднее появились станки с кривошипным приводом, в основе которого был заложен коленчатый рычаг – древний коловорот, использовавшийся первобытным человеком для сверления. По утверждению историка **Плиния Старшего**, в 4 в. до н.э. знаменитый мастер **Феодор**, житель острова Самоса в Эгейском море, производил обтачивание металлических деталей замков на токарном станке собственной конструкции (рис. 7) [23].



**Рисунок 7** - Токарный станок древнегреческого мастера Феодора VI в. до н.э. (по книге Плиния «Естественная история» 1 в. до н.э.)

Этот станок имел стойку, две бабки для крепления заготовки и кривошипный ножной привод. Для заточки инструмента и шлифования служил шлифовальный круг, сидевший на одной оси с заготовкой и выполнявший одновременно функции маховика. Подобный привод обеспечивал непрерывное вращение заготовки в одну сторону и освобождал обе руки рабочего для манипулирования инструментом, что позволило не только повысить производительность труда, но и качество обработки. При всей своей примитивности он уже имел все основные элементы современного токарного станка [17].

В металлообработке успех обеспечивал не только станок, но и металлорежущий инструмент. Овладев секретами науглероживания и закалки железа, человек стал изготавливать инструмент высокой твердости, прочности, с высокими режущими свойствами. Стало возможным в полном смысле резать металл, а не скоблить, как это было раньше.

Вторым в хронологической последовательности и не менее важным после резания был **метод свободной ковки**. Распространение ковки было связано с совершенствованием кузнечных мехов и кузнечного инструмента, а так же появлением специальных приспособлений, таких как «гвоздильная доска», применявшаяся для высадки головок гвоздей и др.

Получаемое проковкой крицы малоуглеродистое железо обладало хорошей свариваемостью и называлось сварочным. Поэтому уже при получении такого железа был освоен процесс кузнечной (горновой) **сварки**, который вплоть до появления электросварки был одним из основных способов соединения металлов. Затем был освоен способ соединения **клепкой**, а в 8 в до н.э. кузнец **Главк** из Хиоса (Греция) изобрел метод соединения металлических изделий **пайкой** вместо клепки [15].

Широкое распространение, особенно в Греции, получила торевтика (от греч. **toreuo** – вырезаю, чеканю) – искусство ручной рельефной художественной обработки металлических изделий (чеканки, гравирования, отделки и т.п.) с помощью ручных инструментов.

Для изготовления появившихся к тому времени монет использовались почти все известные тогда способы обработки: литье, штамповка, чеканка и др. При производстве



зеркал, золочении и серебрении применялось амальгамирование (от лат. **amalgama** – сплав) – предварительное покрытие ртутью стеклянной или металлической поверхности.

## 1.2. Развитие технологии и оборудования механической обработки

Металлы и прежде всего сплавы на основе железа были средствами войны в античные времена, таковыми они продолжали оставаться и в средние века. Очень медленно по мере роста мастерства металлургов и совершенствования кузнечного ремесла, железо становилось сырьем и для изготовления орудий труда. Появились профессии кузнецов, оружейников, жестянщиков, литейщиков, колокольщиков, лудильщиков, замочников и др. [9].

Средневековые кузнецы хорошо владели различными сложными приемами и способами механической и термической обработки металлов, особенно при изготовлении оружия и доспехов. На протяжении всего средневековья кузнецы считались самой почтенной и уважаемой категорией ремесленников, причем наибольшим почетом пользовались оружейники. Восток стал поставщиком холодного оружия и слитков дамасской стали, которая на Руси называлась булатом.

С XVII в. для выделки сортового железа стали появляться вододействующие прокатные станы для прокатки, выделки жести, чеканки медалей и монет (нарезными валками) (рис. 8).

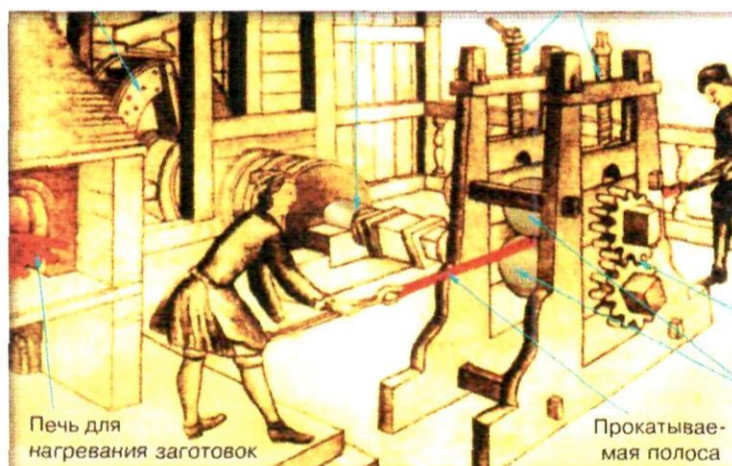


Рисунок 8 - Прокатный стан

**Г. Корт** запатентовал способ прокатки железа с помощью валков (вальцов), который заменил трудоемкую операциюковки криц под молотом. Первую практически пригодную конструкцию универсального прокатного стана создал, как считают, немецкий инженер **Дэлен**, в 1848 г. По другим сведениям, еще в 1830-40 гг. в Европе уже была налажена прокатка железнодорожных рельсов. В 1859 г. русский техник **В.С. Пятов** впервые изготовил броневые плиты, способом прокатки, заменив малопродуктивный пудлинговый способ. В дальнейшем методом прокатки стало перерабатываться до 80% всей выплавляемой стали.

Широко начинают применяться протяжные устройства для вытягивания проволоки (рис. 9), хотя первый гидравлический волочильный стан был изобретен в Германии еще в 1351 г.

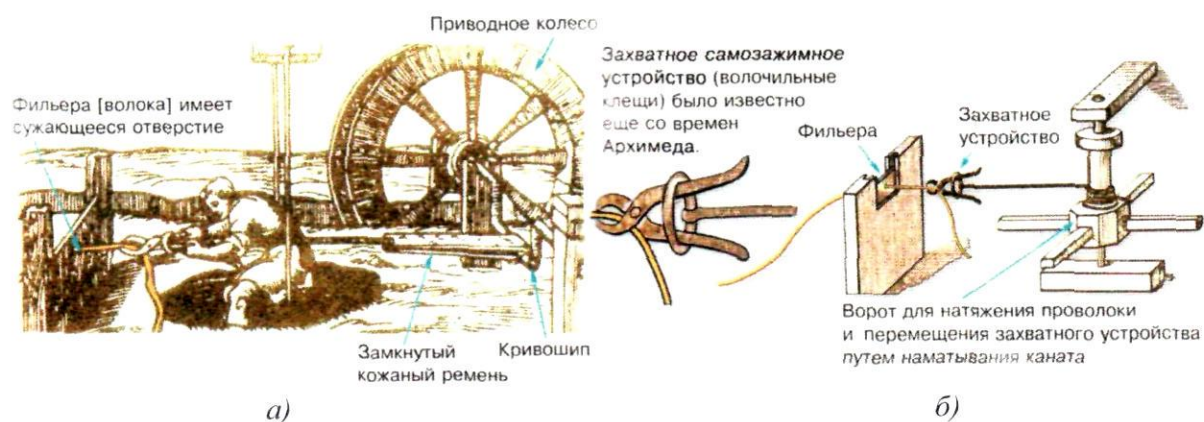


Рисунок 9 - Волочение проволоки: а - из стали; б - из золота

Для преобразования вращательного движения водяного колеса в колебательное, например, молота, широко использовались кулачковые устройства, например такие, которые использовались для привода воздуходувок. Расширилась добыча цветных и драгоценных металлов и получение сплавов. В медеплавильном производстве последовательной плавкой в нескольких горнах выплавлялась медь, которая применялась как в чистом виде, так и в виде различных сплавов: бронзы, латуни, колокольного и подшипникового сплавов. В России получила большое развитие выплавка драгоценных и цветных металлов из полиметаллических руд на Урале и Алтае. С 1740-х гг. на Алтае, на базе Змеиногорского месторождения, которое разрабатывалось с помощью знаменитой вододействующей **системы Фролова**, на Барнаульском заводе было налажено крупнейшее в России сереброплавильное производство. На заводе в 1751 г. действовало 14 водяных колес, которые обслуживали 22 рабочих механизма: воздуховудные меха, молота, толчеи, пилы и др.

Истинного расцвета получило литейное дело (литье чугуна, бронзы и др. сплавов), особенно в России. Начинают изготовлять способом литья колокола и пушки (рис. 10), так XV в. в Москве открылся Пушечный двор, а в XVI в. появились колокольные заводы в Воронеже, Костроме, Енисейске, Валдае. Замечательными образцами русского монументального художественного литья считаются «царь-пушка» и «царь-колокол».

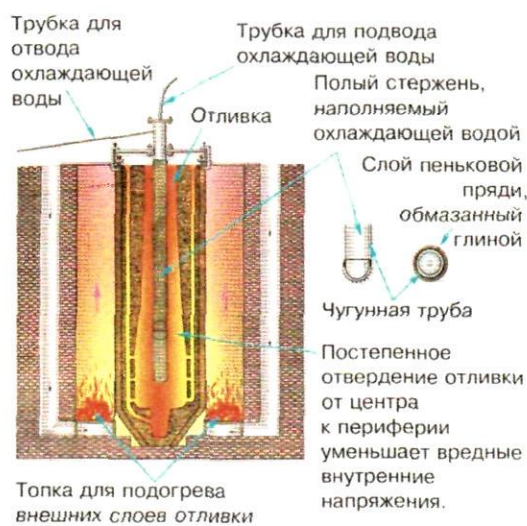


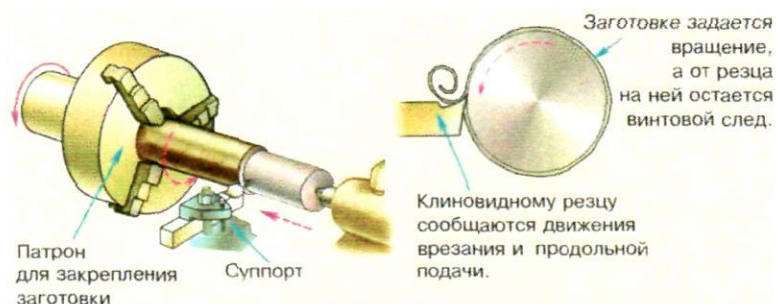
Рисунок 10 - Литье чугунной пушки



«Царь-пушка», предназначенная для обороны Кремля, была отлита в 1586 г. русским литейщиком **А. Чеховым**. Ее ствол имел длину 5,34 м, калибр – 890 мм и весил 40 т. Чудом литейного искусства является отлитая из меди в 1588 г. тем же Чеховым ствольная пищаль с калибром стволов 50 мм. Как и Чехов, числилась «артиллерии и колокольных дел мастерами» также **семья Моториных**. «Царь-колокол», отлитый Иваном Моториным и его сыном Михаилом в 1735 гг., весил более 200 т, имел диаметр 6,6 м и высоту 6,14 м. Опыт пушечных и колокольных мастеров пригодился доследующим поколениям металлургов и сыграл важную роль в совершенствовании технологии литья.

Развитие металлургии и резкое увеличение производства металла дало мощный толчок развитию металлообработки и совершенствованию металлорежущего оборудования. Токарный станок, в свое время возникший как универсальный механизм для вытачивания изделий из дерева и кости, стал находить все большее применение в металлообработке. На рубеже XVI-XVII вв. вышла книга французского ученого **Ш. Плюмье** «Искусство точения», переведенная в 1716 г. на русский язык по приказу **Петра I**. В ней был собран и систематизирован опыт, накопленный за это время токарями-ремесленниками разных стран в области обработки резанием различных материалов.

На протяжении XVII в. токарный станок подвергся значительному совершенствованию, которое состояло, прежде всего, в отделении привода от станка и переходе от мускульного ручного и ножного привода к гидравлическому. Дальнейшее совершенствование было связано с появлением суппорта – основного узла для закрепления и перемещения режущего инструмента (рис. 11).



**Рисунок 11** - Принципиальная схема обработки резанием тел вращения

Заменив человеческую руку, это механическое приспособление позволило производить геометрические формы отдельных частей машин с высокой легкостью, точностью и быстрой. Специальная «держалка» для резца была впервые описана в труде французского математика и механика **Жака Бессона** «Театр инструментов», появившемся в 1565 г. Она применялась в токарно-винторезном станке для удержания инструмента, которая была им названа суппортом (англ. и фр. **support** от лат. **supportare** - поддерживать). Этот станок имел крестовой суппорт и кинематическое соединение заготовки и резца. Привод станка осуществлялся вручную (натяжением шнура). Для разгрузки подвижных частей от сил тяжести служили специальные противовесы. Они же обеспечивали постоянную силу врезания резца.

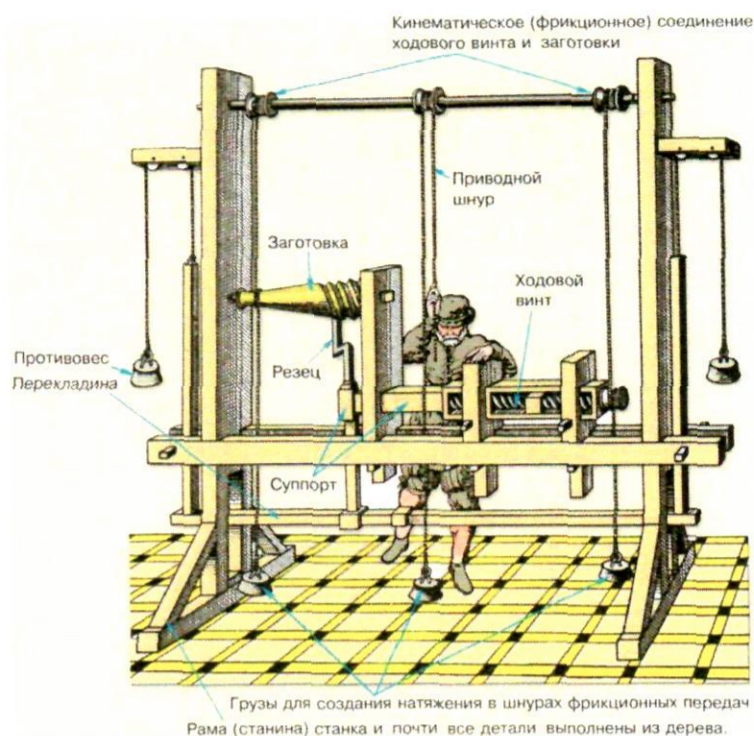


Рисунок 12 - Токарно-винторезный станок Ж. Бессона

Суппорт в этом станке представлял собой двухползунный механизм с взаимноперпендикулярными направляющим. Продольное движение (параллельное оси заготовки) задавалось ходовым винтом от ручного привода, а поперечное движение осуществлялось при постоянном прижатии к заготовке с помощью противовеса. С помощью специальной перекладины можно было отводить резец от заготовки (рис.12).

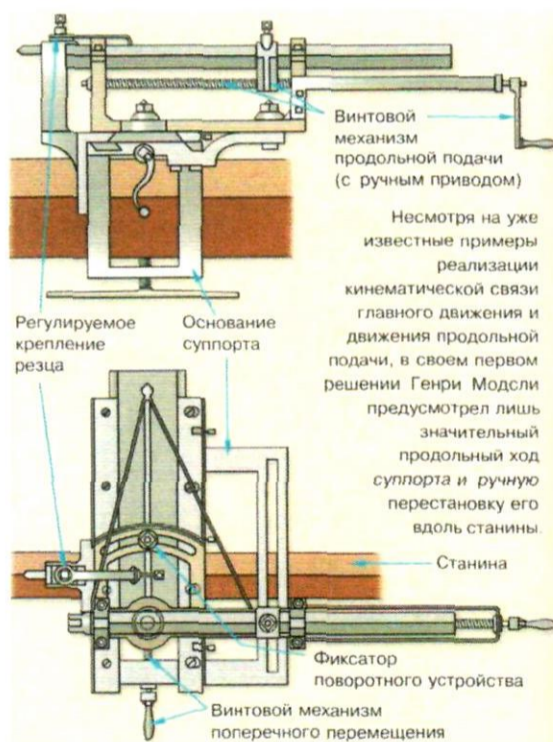


Рисунок 13 - Суппорт конструкции Г. Модсли

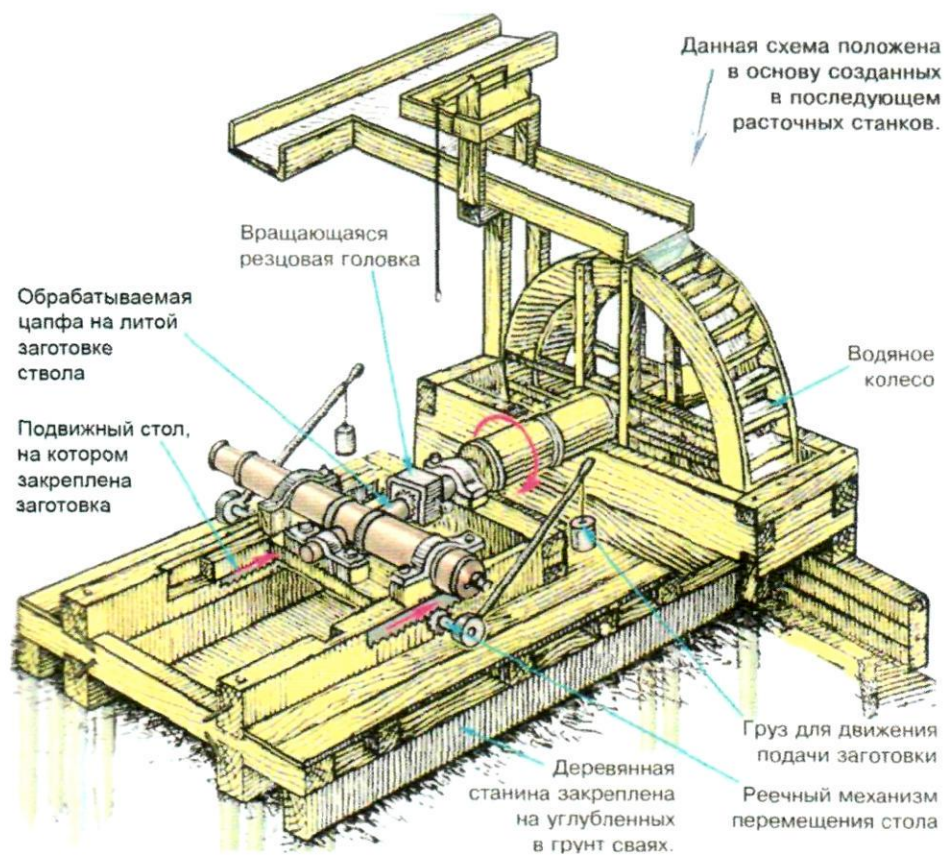


Но лишь «держалку» русского изобретателя **Андрея Нартова** в созданном им в 1729 г. токарно-винторезном станке уже можно было назвать суппортом. С ее помощью резец не только надежно закреплялся, но и механически перемещался в продольном направлении с помощью винта, а в поперечном от копира. Только в 1794 г. **Генри Модсли** изобрел и запатентовал «крестовый суппорт», представляющий две каретки, имеющие возможность независимого перемещения в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью винта (рис. 13).

В таком виде суппорт и просуществовал до настоящего времени. В то же время он изобрел дыропробивной пресс для пробивки отверстий в листах котельного железа и сконструировал микролитический штангенциркуль. Все эти нововведения, и изобретения позволили ему в 1812 г. первому организовать массовое, механизированное производство винтов и гаек на своем машиностроительном заводе.

Деятельность личного токаря Петра I, выдающегося изобретателя, впоследствии первого президента Российской академии наук, А.К. Нартова вписана красной строкой в историю техники.

Всего этот выдающийся изобретатель создал 13 типов токарных станков, среди которых несколько токарно-копировальных (1718-29), токарно-винторезный с механизированным суппортом и сменными зубчатыми колесами (1738), а также зубофрезерный станок для нарезания зубчатых колес. В своей книге *«Театрум Махинарум»* он описал технологию изготовления и сборки нескольких десятков станков. Одним из таких станков, который он считал высшим достижением своей жизни, был станок для обтачивания цапф оружейных стволов (рис. 14).



**Рисунок 14** - Станок конструкции А.К. Нартова для обтачивания цапф оружейных стволов

До него цапфы (цилиндрические выступы по бокам ствола) обрабатывали вручную напильниками по шаблону. При этом получались большие отклонения от цилиндричности и соосности цапф. Применение станка Нартова позволило значительно уменьшить отклонения от формы, благодаря этому русские пушки в то время стали самыми точными в стрельбе.

Значительному совершенствованию подверглись также сверлильные станки, которые с первой половины XVI в. стали переводиться на привод от водяного колеса. Сначала на них в основном производили рассверливание (расточивание) ружейных и пушечных стволов, потом стали переходить и на выпуск гражданской продукции.

В 1649 г. в Москве на р. Яуза было создано первое в Европе предприятие мануфактурного типа для обработки пушечных стволов, называемое ствольной мельницей. Для рассверливания канала ствола применялись сверлильно-расточные станки двух типов с приводом от водяного колеса. В станках первого типа рассверливание осуществлялось сверлильной штангой (борштангой), с закрепленными в ней несколькими резами, которая вращалась с помощью водяного колеса и подавалась сверху вниз канатной передачей в направлении ствола, установленного вертикально, дульной частью вверх. Во втором варианте (рис. 15) ствол располагался сверху, и подача его осуществлялась под действием собственного веса.

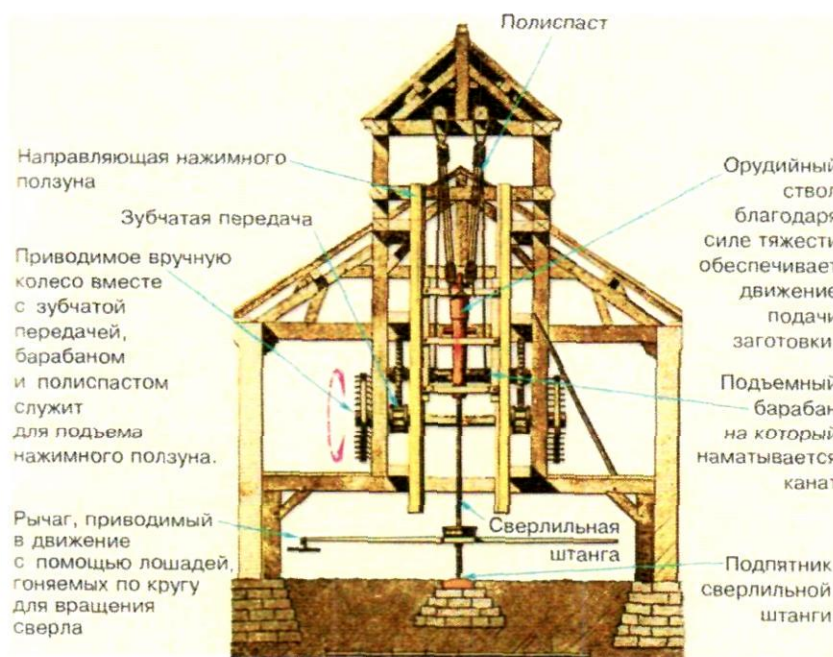


Рисунок 15 - Станок для рассверливания орудийных стволов

При этом обеспечивался лучший отвод стружки, но усложнялись установка ствола и его вращение.

В 1704 г. на станке второго типа с вращающейся заготовкой швейцарец **Ж. Мориц-старший** первый просверлил канал в сплошной заготовке орудийного ствола, положив начало методу сплошного глубокого сверления, ставшего известным под названием «метод Морица». В 1740-х гг. его сын **Мориц-младший**, работавший во Франции, вместе со своими коллегами применил для этой же цели усовершенствованный горизонтально-сверлильный станок, предназначенный также для глубокого сверления.



В 1712-14 гг. на Олонецком заводе в России мастер **В. Геннин** на базе вододействующей установки создал станочный комплекс, состоящий из пилы для отрезки прибылей, горизонтально-сверлильного станка и станка для наружной обработки пушечных стволов. В это же время на Тульском оружейном заводе **Марк Сидоров** на той же базе создал 12-шпиндельные «вертельные» станки для сверления ружейных стволов, которые были улучшены **Яковом Батищевым** и могли одновременно обрабатывать по 24 ствола. Это были первые в истории многошпиндельные станки полуавтоматического действия [13].

К концу XVII в. наряду со сверлильными и токарными появились и горизонтально-расточные станки, которые в отличие от специализированных горизонтально-сверлильных станков для ружейного и пушечного сверления были станками универсального назначения. Их появление было связано с потребностью в расточке цилиндров паровых машин, насосов, воздуходувок и других механизмов. Таким стал горизонтально-расточной станок, созданный английским изобретателем **Д. Вилкинсоном** в 1775 г., который усовершенствовал существовавшие до него менее совершенные устройства для расточки. Так, десятью годами раньше **И.И. Ползунов** производил расточку цилиндра своей паровой машины на им же специально изготовленном для этого станке. Позже, в 1769 г., аналогичные операции на станке собственной конструкции осуществлял англичанин **Джон Смитон**, кому некоторые отдают приоритет в изобретении горизонтально-расточного станка (рис. 16).

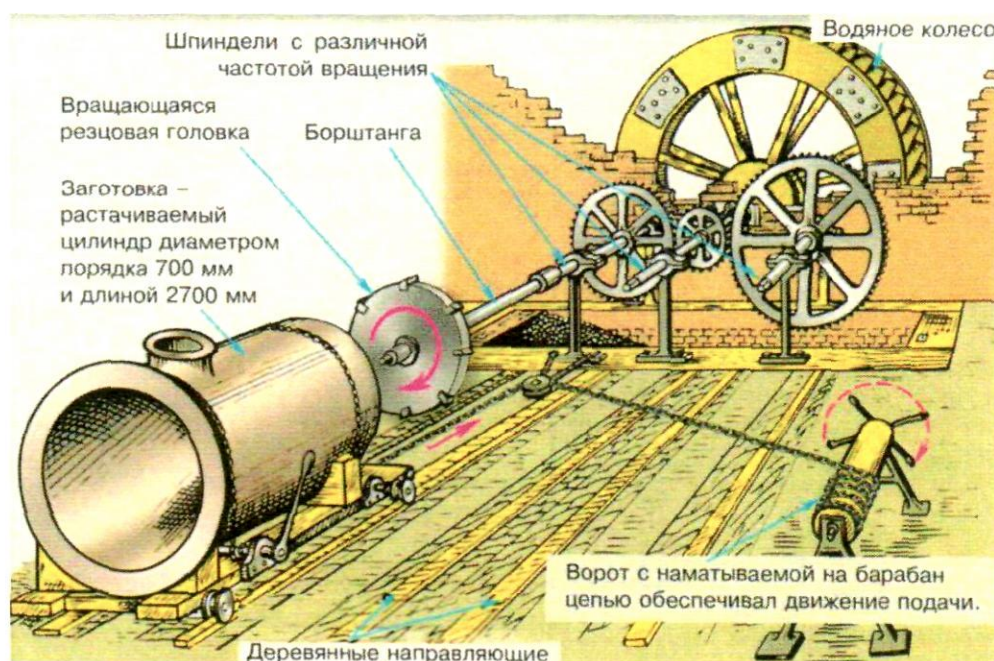


Рисунок 16 - Станок Д. Смитона для обработки внутренней поверхности цилиндра

### 1.3. Опережающее развитие машиностроения и механообработки

С XVI по XIX вв. объем машиностроения увеличился более чем в пять раз. Этому во многом способствовало развитие технических наук и прежде всего теории машин и механизмов. В 1875 г. немецкий ученый **Ф. Рёло** впервые четко сформулировал и



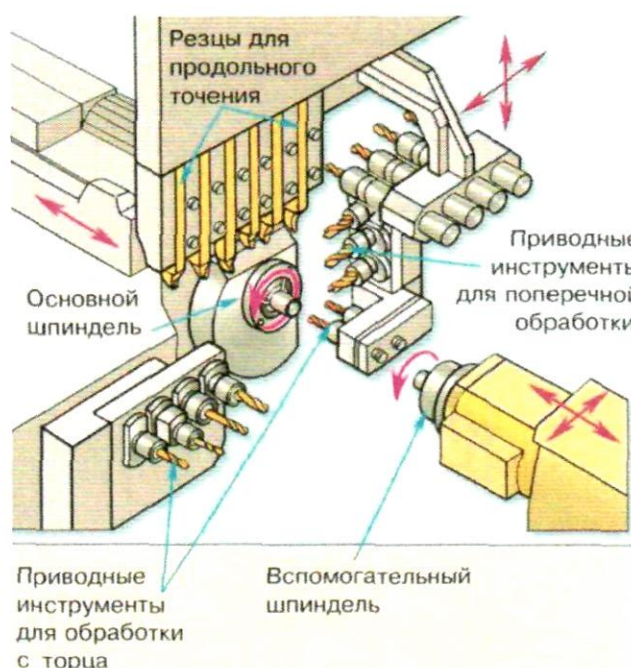
изложил основные вопросы структуры и кинематики механизмов, заложив основы **теории механизмов и машин**. Развитие машинной техники потребовало решения проблем их автоматического регулирования. Основателем теории автоматического регулирования (1877-1878) считается русский ученый **И.А. Вышнеградский**, а его продолжателем (1893-1899) – словацкий теплотехник **А. Стодола** [14].

Увеличение быстроходности машин и величины статических и динамических нагрузок потребовали совершенствования их смазки для увеличения срока службы. В 1880-е гг. русский ученый **Н.П. Петров** и английский физик **О. Рейнольдс** заложили основы **гидродинамической теории смазки**. Петров, в частности, в 1885 г. опубликовал свою знаменитую работу *«Трение в машинах и влияние на него смазывающей жидкости»*. Непрерывно возрастающий объем механической обработки способствовал интенсивному развитию и становлению новой науки – теории обработки материалов резанием. В 1870 г. горный инженер **И.А. Тиме** защитил диссертацию на тему *«Сопротивление металлов и дерева резанию»*, а в 1885 г. уже в ранге профессора опубликовал первый капитальный труд по технологии металлообработки под названием *«Основы машиностроения. Организация машиностроительных фабрик в техническом и экономическом отношении и производстве в них работ»*. Исследования Тиме продолжил **К.А. Зворыкин**, опубликовавший в 1893 г. свою работу *«Работа и усилие, необходимые для отделения металлических стружек»*. Из западных ученых наибольший вклад в науку и практику резания металлов внес американский инженер **Ф. Тейлор**, президент американского общества инженеров-механиков. В 1880 г. он впервые установил эмпирическим путем режимы резания на токарных станках. В 1903 г. вышла его знаменитая книга *«Искусство резания металлов»*, в котором были обобщены достижения в области металлообработки и получены важнейшие эмпирические зависимости для определения режимов резания. Тейлору принадлежит также и приоритет разработки **быстрорежущей стали**, который он разделил со своим соотечественником **М. Уайтом**. Взяв за основу известную инструментальную сталь марки «Мидвель», Тейлор и Уайт применили высокотемпературную закалку, обеспечившую ей высокую твердость и теплостойкость, а также улучшили первоначальный ее состав. Созданный Тейлором и Уайтом инструментальный материал на основе вольфрама, обладающей высокой стойкостью при больших температурах резания и позволивший поднять скорости резания в 5 раз, поэтому и был назван «быстрорежущей сталью». Достигнутые скорости в 40 м/мин в то время считались фантастическими и представляли настоящую революцию в металлообработке [26].

Поиски новых эффективных инструментальных материалов с разработкой быстрорежущей стали не прекратились. В 1907 г. англичанином **Хейнсом** был запатентован «стеллит» (от лат. **stella** – звезда) – литой твердый сплав на основе **кобальта**, применяющийся не только для изготовления режущих инструментов, но и для наплавки деталей машин и инструмента с целью повышения износостойкости. В 1913-1914 гг. в Германии изобретателем **Ломаном** был разработан **твердый сплав**, содержащий карбид вольфрама и получивший название «ломанит». Он отличался исключительно высокой твердостью, приближающейся к твердости алмаза, но, как и «стеллит», был чрезвычайно хрупким, к тому же дорогим, из-за чего и не получил большого распространения.

Резкий скачок скоростей резания потребовал коренного изменения конструкции металлорежущих станков и прежде всего совершенствования его привода, а также их автоматизации и специализации. Начался массовый переход от громоздких ременных передач и сложных трансмиссий к индивидуальному электрическому приводу. Другим важным направлением в области станкостроения стал переход от универсальных к специализированным и специальным металлорежущим станкам. Это диктовалось переходом от индивидуального и мелкосерийного к серийному, крупносерийному, а затем и массовому производству [8].

К концу XIX в. пальма первенства в области станкостроения переходит к американским предприятиям, наладившим не только выпуск всей гаммы универсальных металлорежущих станков, но и специальных, а также станков-автоматов. В 1873 г. **Х. Спенсер** создал первый станок-автомат на базе токарно-револьверного станка. Появляются полуавтоматы для прутковых работ **Джонсона**, автоматы системы «Кливленд» и многошпиндельные автоматы высокой производительности, ставшие прообразами современных станков (рис. 17).



**Рисунок 17** - Современный многошпиндельный станок-автомат фирмы Star Micronics

В России универсальные станки собственных конструкций производились такими крупными заводами как Невский, Мотовилихинский (Пермь), Нобеля, братьев Бромлей, Харьковский паровозостроительный и др. Однако массового производства станков на специализированных заводах не существовало, поэтому вплоть до начала первой мировой войны станочный парк состоял в основном из станков иностранного происхождения.

Резкого повышения производительности в машиностроении нельзя было достичь лишь совершенствованием металлорежущего оборудования. Нужна была и широкая механизация транспортировки деталей при их обработке и сборке машин. В 1913 г. на заводе **Г. Форда** был впервые применен конвейер для механизации внутризаводской транспортировки при сборке автомобилей [20].

## 2. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### 2.1. Современные методы механической обработки

К авиастроительной продукции предъявляются повышенные требования по качеству, особенно надежности и долговечности, что зависит не только от совершенства её конструкции, но и в значительной степени от качества обработки деталей и их сборки. Знание технологических методов обработки позволяет создавать более совершенные конструкции авиалайнеров, обеспечивая одновременно экономическую целесообразность их изготовления. Одним из наиболее распространенных методов является **механическая обработка**, заключающаяся в формировании деталей заданных размеров, точности и качества поверхности путём срезания режущим инструментом с поверхностей заготовок слоя материала в виде стружки.

Обработка, которая осуществляется путём внедрения режущего инструмента в тело заготовки с последующим выделением стружки и образованием новой поверхности называется **резанием**. Процессы ковки, штамповки, прессование, накатывание резьбы, то есть процессы, которые осуществляются под силовым воздействием внешней силы, при этом меняется форма, конфигурация, размеры, физико-механические свойства детали называют **обработкой пластической деформацией**. Для получения поверхностей с регулярным макрорельефом (теплообменных, фильтрующих), для восстановления размеров изношенных поверхностей трения применяют **обработку методом деформирующего резания**, основанного на совмещении процессов резания и пластического деформирования подрезанного слоя. Обработка, основанная на использовании специфических явлений электрического тока: искра (электроэрозионная обработка), электрохимия (Электрохимическая обработка), дуга (электрическая дуговая сварка) называется **электрофизической**.

Основоположником учения о механическом резании был русский учёный **Иван Тиме**, который в конце XIX века впервые исследовал процесс стружкообразования (взаимосвязь геометрии режущего инструмента с режимами обработки и силы резания). Дальнейшее развитие наука о резании получила в работах **Константина Зворыкина** и **Андрея Брикса** о силе, действующей на контактные поверхности инструмента. В зависимости от способа формообразования поверхностей выделяют следующие методы механической обработки:

**Точение** – обработка поверхностей заготовок, имеющих форму тел вращения. Точение характеризуется вращательным движением заготовки и поступательным движением инструмента – резца. На токарных станках выполняют черновую, получистовую и чистовую обработку поверхностей заготовок, нарезают различные виды наружной и внутренней резьбы.

**Сверление** – метод механической обработки внутренних цилиндрических поверхностей в сплошном материале заготовки с помощью сверл. На сверлильных станках также обрабатывают различными инструментами имеющиеся в заготовках (литых, штампованных и др.) отверстия для получения заданной формы, увеличения размера, повышения точности и снижения шероховатости поверхности.



**Растачивание** – это метод обработки отверстий расточными резцами. На расточных станках обрабатывают отверстия чаще всего в корпусных деталях. Главным движением является вращение инструмента. Движение подачи может совершать заготовка или инструмент.

**Фрезерование** – это высокопроизводительный метод механической обработки поверхностей деталей многолезвийным инструментом – фрезами. Для фрезерования характерно непрерывное главное движение инструмента и поступательное движение подачи заготовки. В некоторых случаях заготовка совершает круговое или винтовое движение подачи.

**Шлифование** – чистовая и отделочная обработка деталей с высокой точностью. Обрабатывать можно заготовки из самых разнообразных материалов, а для заготовок из закаленных сталей шлифование является одним из наиболее распространенных методов механической обработки.

## 2.2. Проблемы механической обработки современных авиационных конструкций

В авиационной промышленности, в условиях жёсткой борьбы за потребителя, ведущие мировые производители в качестве главного стратегического направления выбирают путь на создание лёгкого и высокоэкономичного летательного аппарата.

Динамика развития конструкций летательных аппаратов показывает, что в настоящее время металлические конструкции, пройдя путь 60-летней эволюции, по существу, достигли максимума своей эффективности, поскольку рост технических характеристик существующих металлических дюралевых сплавов существенно замедлился.

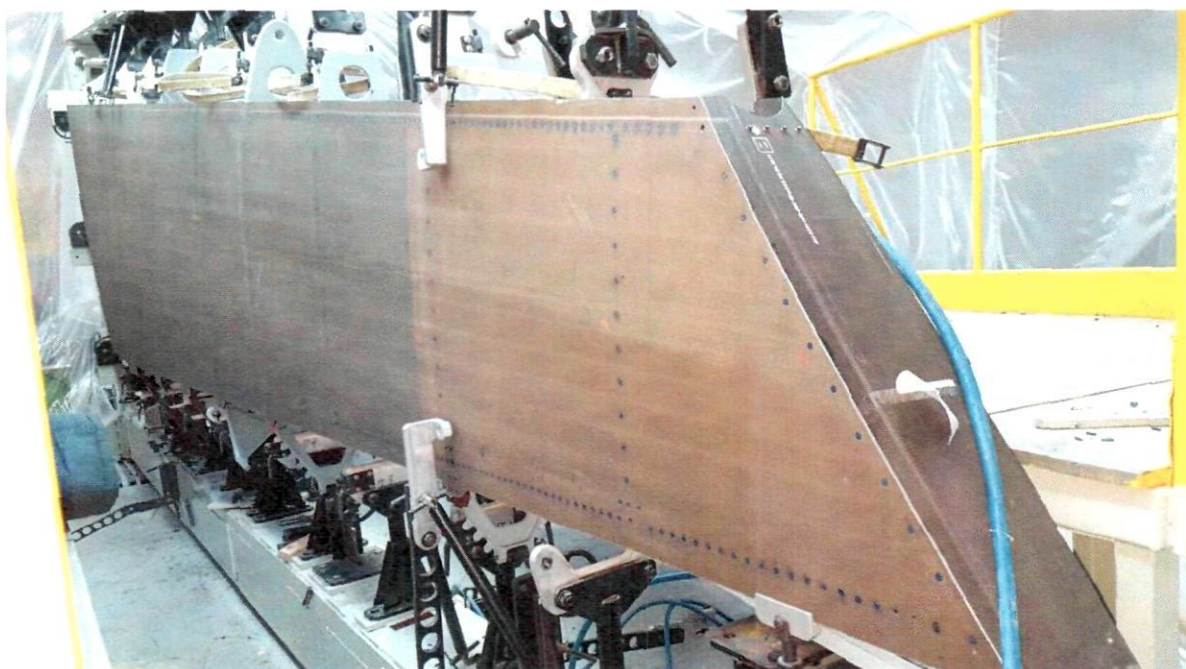
В настоящее время получают всё большее применение **композиционные материалы**. Выполненные из композиционных материалов детали прочнее стали, легче алюминия и такие же жесткие, как титан (рис. 18).



Рисунок 18 – Области применения композиционных материалов

Дальнейшее повышение транспортной эффективности, как за рубежом, так и в России связывают, главным образом, с внедрением в силовую конструкцию планера новых **композиционных материалов** на основе **углеродного волокна (КМУ)**, обладающих высокими удельными прочностными и эксплуатационными характеристиками. В новейших моделях самолетов >50% по весу составляют композиты. Так, в зависимости от области применения определяются геометрия и типы применяемых КМУ:

- Несущие элементы конструкции - Эпоксидная смола с высокой или средней термостойкостью, высокопрочные (HS) или высокомодульные (IM) углеродные волокна.
- Интерьер - Фенольные смолы, высокопрочные (HS) углеродные волокна, стекловолокно, арамид (кевлар).
- Ненесущие элементы конструкции - Смолы с низким сопротивлением деформации (полиэстер, винилэстер) [1].



**Рисунок 19** - Первый в России кессон кия, выполненный из КМУ

Применение КМУ позволяет снизить массу конструкции за счёт снижения числа входящих в сборочный узел деталей, а так же сокращения числа конструктивных и технологических разёмов (рис. 19). Исключение концентрации напряжений в стыке позволяет повысить ресурс и надёжность планера, а прочность соединения становится равной прочности основных элементов.

Вместе с КМУ значительно увеличивается доля применяемых деталей из титановых сплавов в виду их высоких механических характеристик, гарантированных при высоких нагрузках, которые возникают при эксплуатации современных воздушных судов.

Однако, несмотря на достигнутый высокий уровень интегрированности конструкций из КМУ, сборными по-прежнему остаются их узлы и отсеки. Учитывая



значительные габариты агрегатов планера современных пассажирских самолетов, количество крепежа составляет десятки тысяч штук (рис. 20). Такое же количество отверстий с требуемыми геометрическими, точностными и качественными параметрами должно быть выполнено в собираемых конструкциях. В зависимости от назначения отверстий, к ним предъявляются требования по диаметру с заданной точностью, прямолинейности оси отверстия и образующей его поверхности, правильности цилиндрической формы отверстия (отсутствие конусности, овальности и огранки), перпендикулярности оси торцевым поверхностям детали.



Рисунок 20 – Внутренний контур кессона кия, выполненного из КМ

Специфика свойств изделий из КМУ делает невозможным эффективно использовать существующие технологии по механической обработке металлов резанием. Особенно сложной задачей является разделка отверстий в **смешанных пакетах**, таких как КМУ-Ti-Al. Для минимизации погрешностей установки и соединения различных конструкций, отверстия в таких пакетах необходимо разделять совместно. При разработке такой методики разделки отверстий инженеры сталкиваются с проблемами, возникающими в виду разности требований к качеству и режимам механической обработки для каждого из материалов пакета. Разность при выборе скорости подачи режущего инструмента, скорости вращения шпинделя сверлильного устройства при обработке деталей из Al и Ti сплавов и конструкций из КМУ приводят к неравномерному нагреву элементов пакета при сверлении, поверхностным повреждениям материалов, износу режущего инструмента и т.д. Решение подобных проблем и является **главной проблемой механической обработки отверстий** современных авиационных конструкций.

Ещё одной проблемой является визуальная оценка качества обработки углепластиков. Отсутствие стружки, измерение шероховатости по эталонам, а так же не всегда визуально контролируемые разрушения поверхности конструкций. Основной

индикатор - визуальное качество отверстия и износ режущего инструмента. Происходящие внутренние разрушения матрицы КМУ вообще не выявляются визуально.

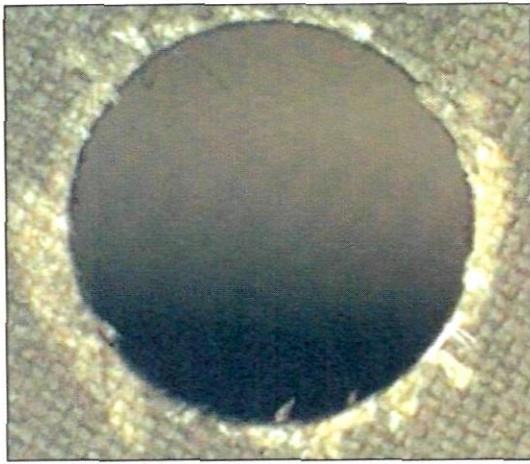


Рисунок 21 – Деламинация



Рисунок 22 – Сколы

Из поверхностных дефектов выделяют **деламинацию** - отделение низлежащего слоя (слоев) из-за большой осевой силы резания при сверлении (рис.21) и появление **сколов** - наличие фрагментов волокон внутри отверстия из-за недостаточной эффективности резания (рис.22).

Поверхностные дефекты наблюдаются, как со стороны входа режущего инструмента, так и со стороны выхода. Величина расслоений со стороны входа намного меньше, чем со стороны выхода. Процесс расслоения в КМУ зависит не только от свойств волокон, но и от свойств матрицы. Данные дефекты возникают в случае превышения осевой силой резания критического значения, равного величине силы прочностных связей волокон обрабатываемого материала. Они зарождаются в матрице и затем распространяются в плоскости, перпендикулярной к оси режущего инструмента.

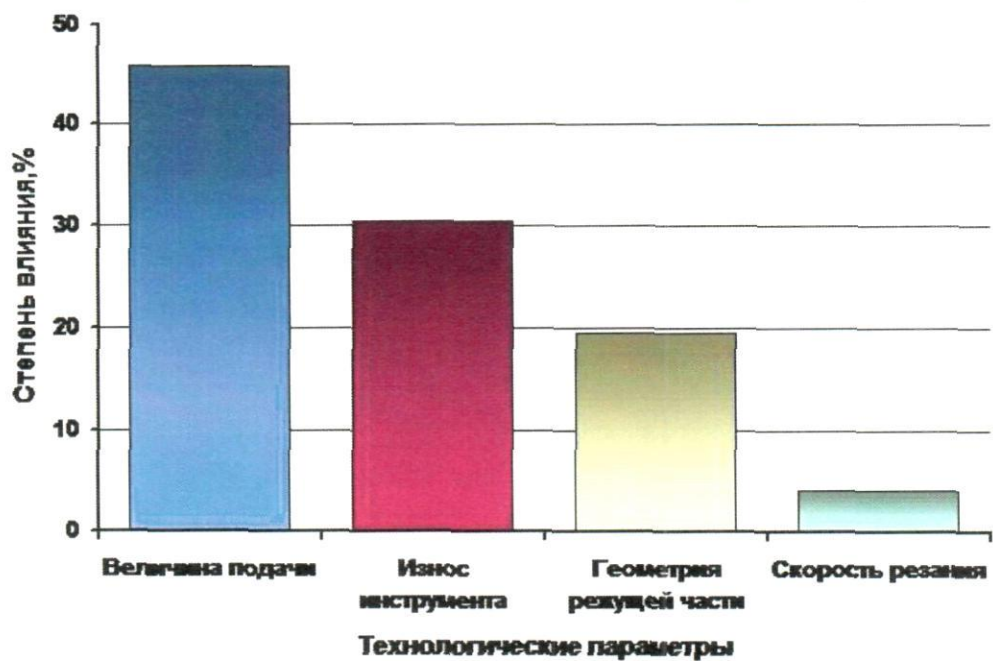


Рисунок 23 - Степень влияния параметров обработки отверстий на величину расслоений



Основными путями уменьшения вероятности возникновения расслоений и их величины при обработке отверстий являются (рис. 23):

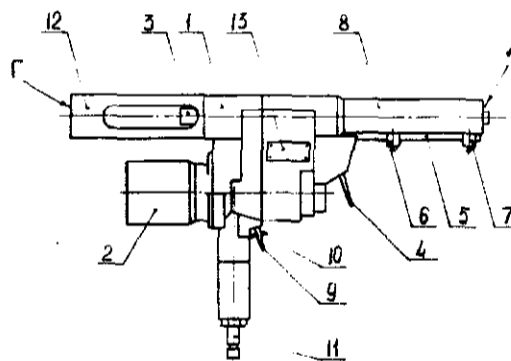
- применение новых инструментальных материалов и покрытий;
- оптимизация геометрии режущей части инструмента;
- разработка специального режущего инструмента (например, инструмента с подрезающими кромками, ступенчатого);
- оптимизация режимов резания (применение адаптивного управления величиной подачи);
- применение поджимных втулок и подложек.

### 2.3. Особенности механической обработки смешанных пакетов

Высокие требования к качеству и технологии разделяемых отверстий в КМУ и, в частности, в смешанных пакетах с применением КМУ, диктуют особые условия разделки отверстий с применением специализированного стационарного оборудования, что в принципе, на этапе изготовления деталей, сложной технологической задачей не является (применение роботизированных обрабатывающих центров) [25].

Серьёзные затруднения возникают на этапе стапельной сборки агрегатов, например при сборке оперения, и центроплана авиалайнера, где применение стационарного оборудования невозможно в виду ограниченного подхода к зонам разделки отверстий и больших габаритов деталей. Поэтому для повышения степени чистоты отверстий, классности, перпендикулярности, избежания возможных задигов на КМУ и др., требуется компактное сверлильное оборудование, имеющее возможность производить разделку отверстий в местах с ограниченным подходом к месту обработки детали.

*Машина сверлильная передняя пневматическая с автоматической подачей.*

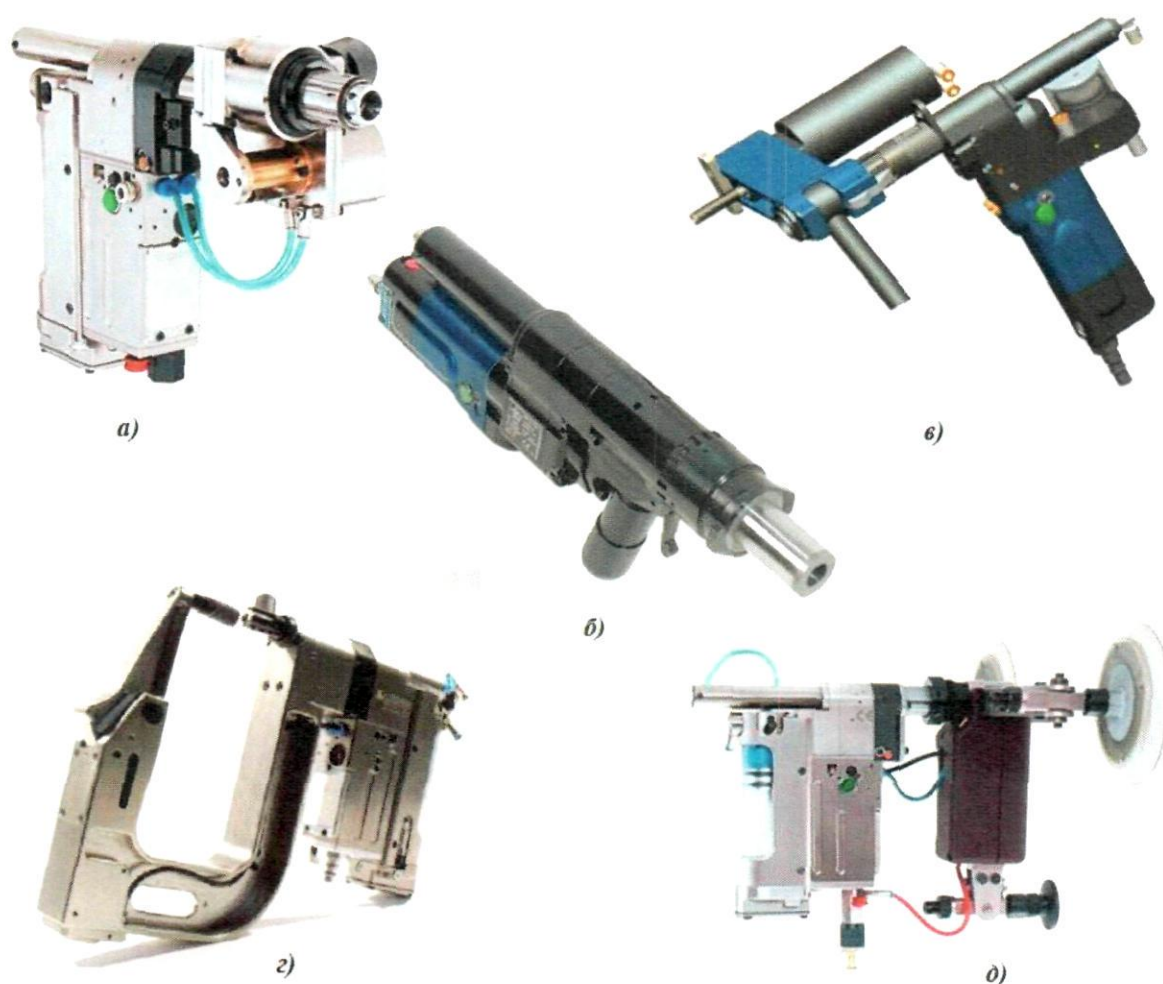


- 1 - корпус; 2 - пневмомотор; 3 - цилиндр; 4 - рычаг включения подачи; 5 - шток; 6 - передвижной упор регулятора глубины обработки; 7 - передний упор регулятора исходного положения шпинделя; 8 - кожух; 9 - курок пускового устройства; 10 - защелка курка; 11 - шпатель; 12 - стакан; 13 - табличка; Г - гнездо для закрепления сменных втулок и насадок; Д - окно и шпатель для смены инструмента

Рисунок 24 – Действующий прототип СМАП АС-200

Устройства, осуществляющие обработку отверстий непосредственно на деталях, составляют семейство **сверлильных машин с автоматической подачей (СМАП)**. Начало экспериментов с подобными типами устройств уходит в 70-е годы XX века. В 1974 году в США был запатентован первый магнитный сверлильный станок. Патент поддерживался во всем мире в течение 17 лет. В 80-е годы XX века оборудование механической обработки сверлением получило новый виток развития. Задokumentированное начало применения СМАП в российской авиационной промышленности приходится на начало 90-х годов (рис. 24).

Современные СМАП предназначены для разделки отверстий, как в однородных материалах, так и в смешанных пакетах материалов (рис. 25). В случае правильно настроенного СМАП (конкретные режимы обработки соответствуют конкретному типу пакета) и верно подобранного режущего инструмента, разделяемые отверстия не требуют дополнительной механической обработки.



**Рисунок 25** – Сверлильные машины с автоматической подачей (СМАП)

Приводом для СМАП служит пневматический или электрический двигатель. По типу механизма автоматической подачи-возврата режущего инструмента СМАП делятся на два вида: с постоянной подачей или с дискретной подачей. Выбор подходящего механизма зависит от следующих факторов:

- толщина пакета;
- свойства материалов пакета;
- характеристики отверстий (диаметр, допуск, наличия зенкования);
- наличие пространства для размещения СМАП;
- условия подачи СОЖ в зону обработки через маслоканалы в инструменте (рис. 26).



Рисунок 26 – Воздушно-масляный туман (MQL)

Для сверления глубоких отверстий в однородных легкообрабатываемых материалах рекомендуется использовать СМАП с постоянной подачей, в то время как для сверления пакетов из труднообрабатываемых материалов или смешанных пакетов лучше всего подходит СМАП с дискретной (импульсной, клюющей) подачей.

В зависимости от размеров свободного пространства для размещения сверлильного устройства и глубины сверления, подбирается соответствующая конфигурация СМАП - продольная или угловая. Модульный принцип построения и подбор соответствующего режущего инструмента позволяют получить устройство, настроенное на конкретную задачу.

СМАП в процессе своей работы совершает как вращательное, как и поступательное движение, обеспечивая периодическую подачу и частичную выемку режущего инструмента. С каждым шагом режущий инструмент погружается на определенную глубину и частично вынимается для охлаждения и освобождения от стружки – такая подача режущего инструмента называется **клюющей** (рис. 27).

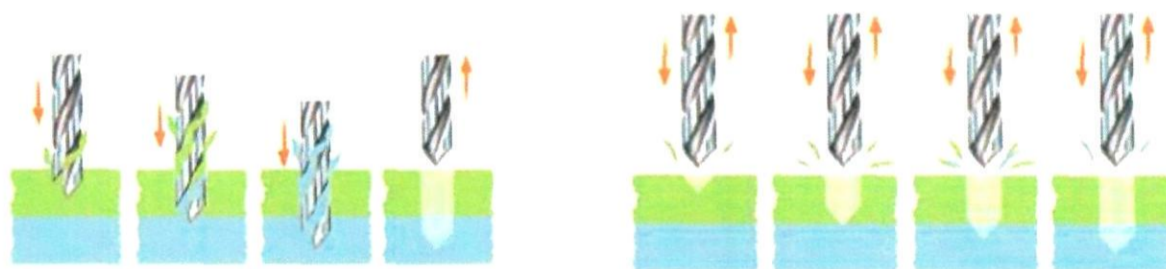


Рисунок 27 - Постоянная подача (слева) и клюющая (справа)

При сверлении с постоянной подачей образуется более крупная и длинная стружка, при этом стружка более твердого слоя, проходя через более мягкий материал, может повредить поверхность отверстия в мягком слое. Клюющая подача исключает этот недостаток благодаря образованию мелкой, фрагментированной стружки (рис. 28), выводимой из зоны обработки с помощью промышленного пылесоса[24].



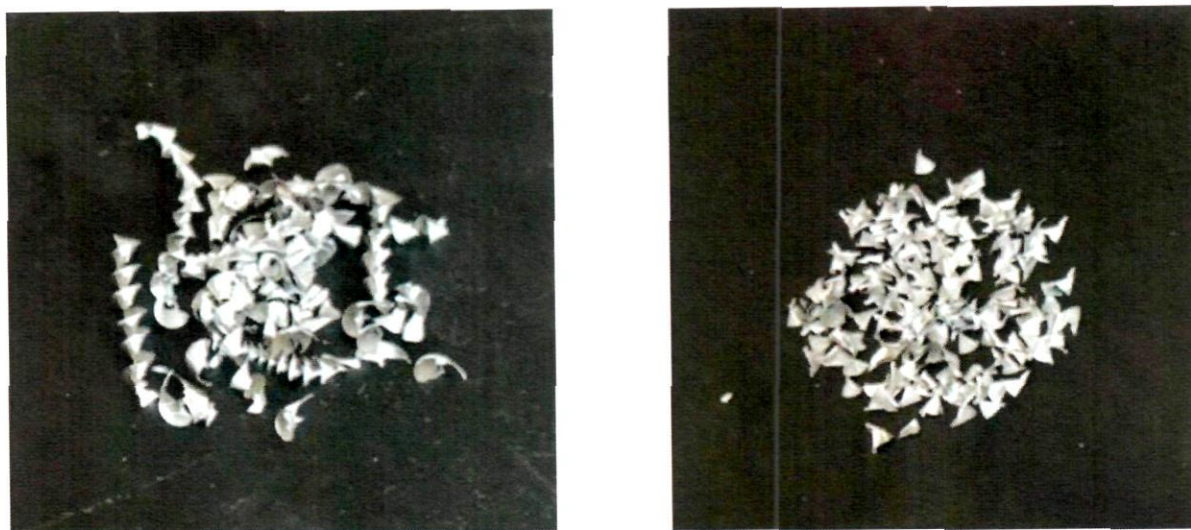


Рисунок 28 – Стружка при постоянной (слева) и при клюющей подаче (справа)

В качестве материала режущего инструмента применяется, преимущественно, твердый сплав (карбид) и другие сверхтвёрдые инструментальные материалы. Инструмент из быстрорежущей стали имеет наименьшую стоимость, но характеризуется наименьшей стойкостью при обработке КМУ. Сверла из поликристаллического алмаза (PCD) обладают наибольшим значением стойкости, однако их стоимость значительно выше стоимости свёрл, изготовленных из быстрорежущей стали и твердого сплава [7].

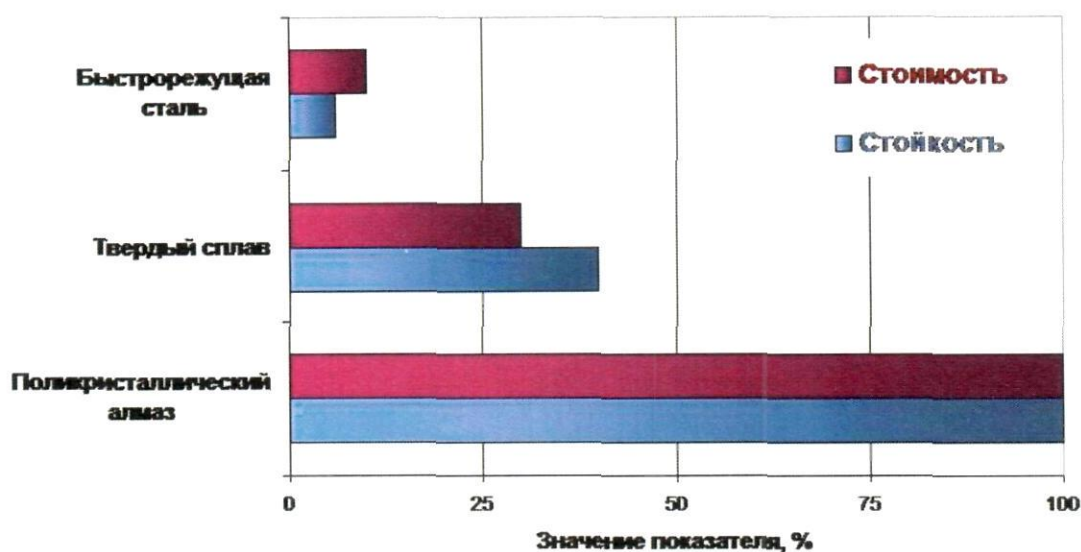
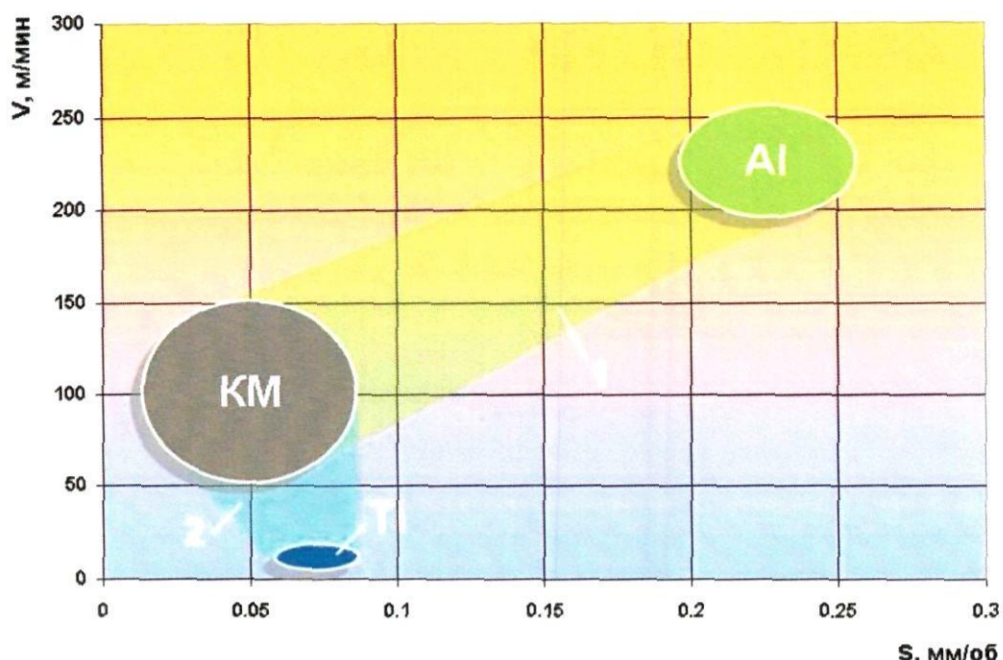


Рисунок 29 - Влияние параметров обработки отверстий на величину расслоения

Применение PCD может быть экономически обоснованным только при его использования в качестве покрытия режущей части инструмента.

Для назначения режимов резания при обработке смешанных пакетов, необходимо искать компромиссное решение (рис. 30, зона 1 и 2), позволяющее обеспечить сопоставимое качество отверстий в деталях из разнородных материалов.



**Рисунок 30** - оптимальные режимы резания твердосплавным инструментом при обработке материалов, применяемых в авиационной промышленности

Отметим, что эффективность механической обработки зависит не только от совершенства оборудования, но и от степени изученности физических явлений при резании. Наиболее приемлемым путем повышения точности и производительности, снижения объема доводочных работ и себестоимости изготовления деталей ЛА является применение методов цифрового моделирования процесса механической обработки. На основании анализа электронной модели можно назначать оптимальные режимы обработки, рекомендовать оптимальную геометрию режущего инструмента.

Универсальная программная система конечно-элементного анализа **ANSYS** существует и развивается на протяжении последних 30 лет. Она довольно популярна у специалистов в области компьютерного инжиниринга (CAE, Computer-Aided Engineering) для решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций [4].

Что касается применения **ANSYS** к моделированию процессов резки, то для этих целей используются динамические приложения этой программы – это **ANSYS AUTODYNA** и **ANSYS/LS-DYNA**.

Пакет **ANSYS/LS-DYNA** объединяет в себе расчетный модуль **LS-DYNA** со средствами подготовки исходных данных и обработки результатов в пакете **ANSYS**. Соответственно, не выходя из сессии **ANSYS**, можно создавать, конечно-элементную, модель в препроцессоре **ANSYS**, получать решение по явной схеме интегрирования, используя **LS-DYNA**, и просматривать результаты с помощью стандартных пост-процессоров **ANSYS**.

**Abaqus** – программный комплекс мирового уровня в области конечно-элементных расчетов на прочность, с помощью которого можно получать точные и достоверные решения для самых сложных линейных и нелинейных инженерных проблем.



Модуль Abaqus/Explicit основан на явной схеме интегрирования и предназначен для расчета нестационарной динамики, квазистатики, быстротекущих процессов, таких как, задачи падения, соударения, разрушения и моделирования технологических процессов (рис. 31). Данную программу также можно применить для моделирования процессов резки.

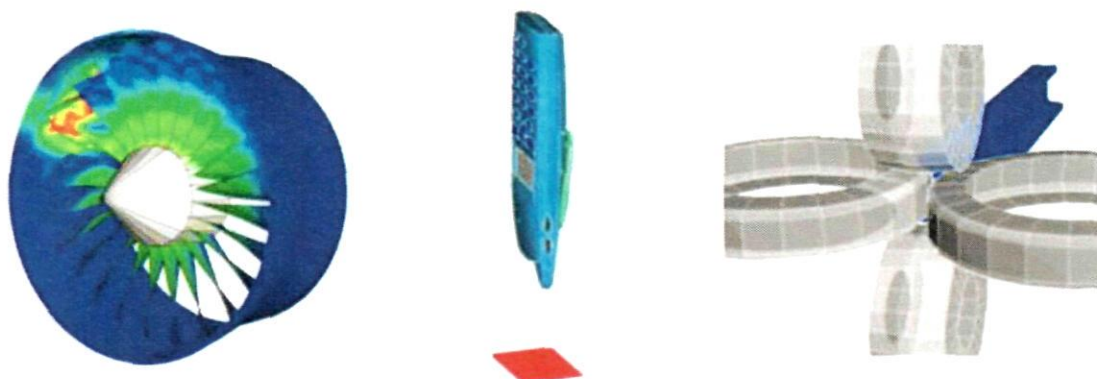


Рисунок 31 – Примеры моделирования в программе Abaqus

**DEFORM-3D** – мощная система моделирования технологических процессов, предназначенная для анализа трехмерного поведения металла при различных процессах обработки давлением. DEFORM-3D предоставляет важную информацию о течении материала в штампе и распределении температур во время процесса деформирования (рис. 32). [2, 5]

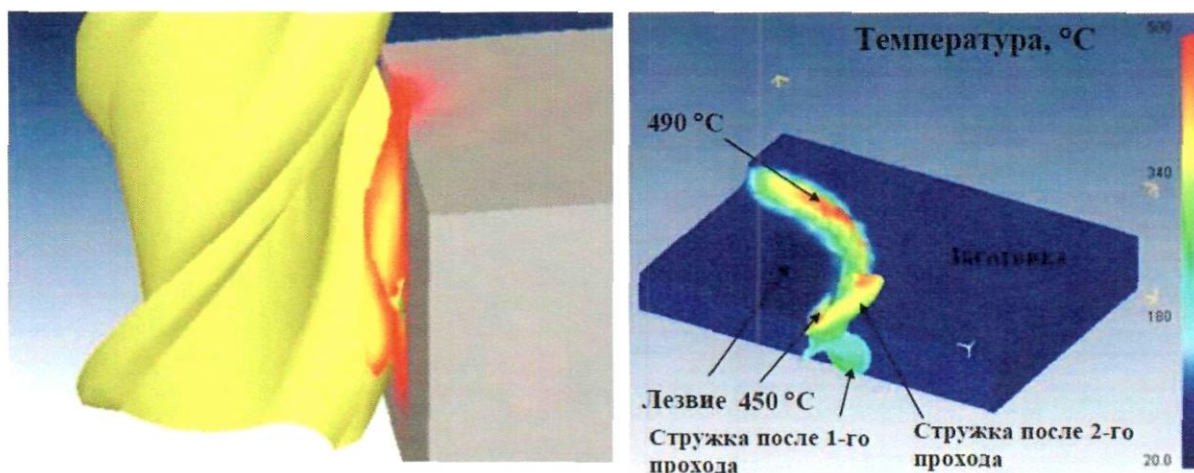
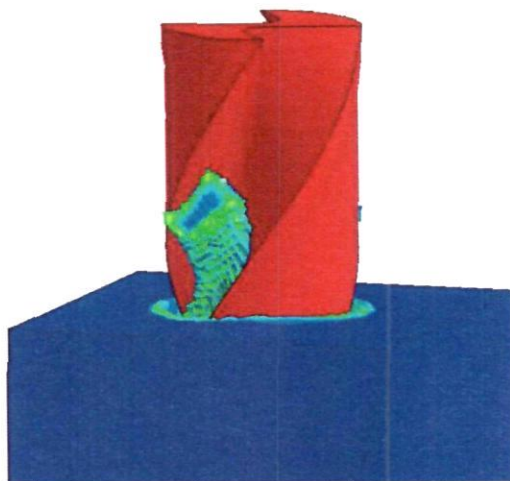


Рисунок 32 - Пример моделирования в программе DEFORM-3D

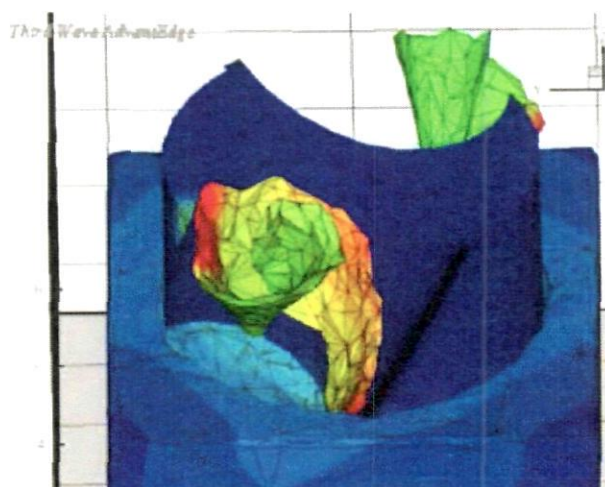
**LS-DYNA** - многоцелевая программа, использующая явную постановку метода конечных элементов, предназначенная для анализа нелинейного динамического отклика трехмерных неупругих структур [6]. Полностью автоматизированный процесс решения контактных задач, а также множество функций по проверке получаемого решения позволяют инженерам во всем мире успешно решать сложнейшие задачи удара, разрушения и формования.

LS-DYNA - одна из лучших программ для моделирования быстротекучих процессов к которым можно отнести процесс механообработки (рис. 33).



**Рисунок 33** – Пример моделирования процесса сверления в программе LS-DYNA [3]

Среди специализированных программ можно посмотреть на программу THIRD WAVE ADVANTEDGE, где интенсивно развивается теоретическая база моделирования образования элементной стружки (рис. 34) с помощью моделирования свободного прямоугольного резания с использованием алгоритма разрушения, локализованным адиабатическим сдвигом.



**Рисунок 34** – Форма стружки при сверлении, рассчитанная с помощью программы THIRD WAVE ADVANTEDGE

Анализ приведенных выше программ на применимость к процессам резания. ABAQUS занимает лидирующие позиции по частоте использования для моделирования процессов резания благодаря своим расширенным возможностям и удобному пользовательскому интерфейсу. Наличие шаблонов для создания моделей резания обеспечивает непрерывный рост популярности пакета DEFORM. LS-DYNA имеет очень



ограниченный пользовательский интерфейс, но имеет повышенную производительность при моделировании многокомпонентных систем. Следует отметить, что программный пакет TWA ориентирован исключительно на моделирование резания. Незначительное количество публикаций с использованием этого программного продукта объясняется его ориентацией больше на производственные предприятия, чем на учебные заведения [22].

На основе программы LS-DYNA существуют несколько специализированных препроцессоров позволяющих значительно облегчить построение модели в данной программе (рис. 35).

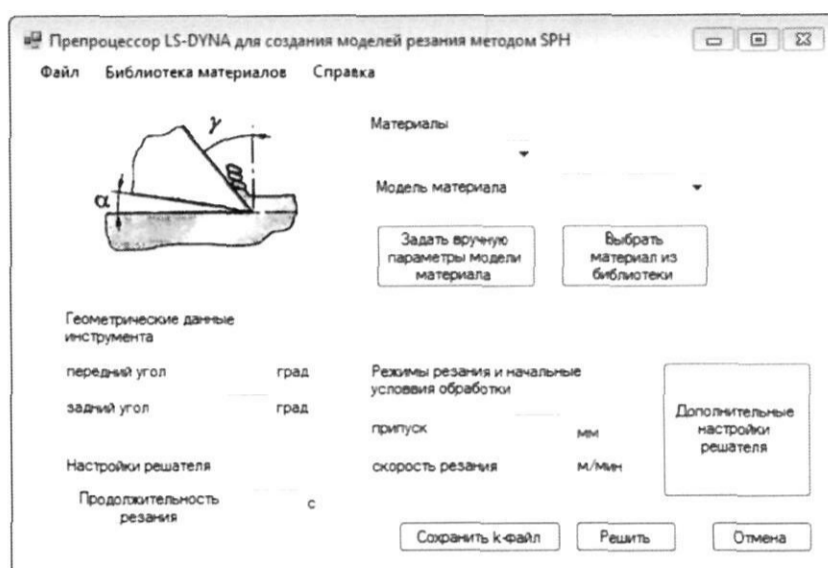


Рисунок 35 – Препроцессор LS-DYNA для создания моделей резания методом SPH [11]

Препроцессор позволяет создавать упрощённую термомеханическую модель стружкообразования на основе параметров инструмента, заготовки и условий обработки. Препроцессор представляет собой **Windows**-приложение, написанное в среде Visual Studio 2012.

## ПОСЛЕСЛОВИЕ

«Задачи модернизации Российской Федерации, которые являются ключевыми для достижения страной современного уровня благополучия, а её гражданами высокого качества жизни, не могут быть решены без существенного прорыва в области результативности научной деятельности, эффективности создания новых поколений техники и технологий. По существу речь идет о переходе отечественной науки на уровень, который по многим параметрам должен не просто соответствовать мировому, но и превосходить его; о становлении и развитии своего рода технонауки и таких форм её организации, которые отвечали бы динамизму экономики современного типа и мобильности социальных структур современного общества в России. В настоящее время наблюдается отставание развития науки в России от темпов развития науки и технологий даже в других странах из состава БРИК (Бразилия, Индия, Китай) - странах, которые, по мнению экспертов, обладают максимальными ресурсами для интенсивного развития...»

В.А. Бажанов [16]

## Литература

1. Ali Faraz, Dirk Biermann, Klaus Weinert. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates. // International Journal of Machine Tools&Manufacture, 49(2009), p. 1185–1196.
2. <http://tesis.com.ru/software/deform/3d.php>
3. <http://tzshp.ru/nashi-primery-modelirovaniya>
4. <http://www.cadfem-cis.ru/>
5. <http://www.deform.com/products/>
6. <http://www.dynaomd.ru/dyna.htm>
7. Luís Miguel P. Durão, Daniel J.S.Gonçalves, João Manuel R.S.Tavares, Victor Hugo C. de Albuquerque, A.Aguiar Vieira, A.Torres Marques. Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. // Composite Structures (2009). – 296 с.
8. Боголюбов А.Н. Творения рук человеческих: Естественная история машин. – М.: Знание, 1988. – 176 с.
9. Буровик Н.А. Родословная вещей. – М.: Знание, 1991. – 246 с.
10. Виргинский В.С., Хотеев В.Ф. Очерки истории науки и техники (с древнейших времен до середины 15 века): Пособие для учителя. – М.: Просвещение, 1993. – 287 с.
11. Гисметулин А.Р., Горбунов И.В., Ефременков И.В. Разработка препроцессора для моделирования операций механообработки в САЕ системе LS-DYNA // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 16, № 1(5), 2014 – с. 1338-1342.
12. Дерри Т.К., Вильяме Т.А. Краткая история технологии с древнейших времен до 1900 г. – Оксфорд, 1960. – 782 с.
13. Евдокимов В.Д., Полевой С.Н. От молотка до лазера. – М.: Знание, 1987. – 192 с.
14. Ермаков Ю.М. От древних ремесел до современных технологий. – М.: Просвещение, 1992. - 127 с.
15. Иванов Б.И., Чешев В.В. Становление и развитие технических наук. – Л.: Наука, 1977. – 262 с.
16. Инновационный потенциал науки. Эпистемологический анализ. / Отв. ред. В.А. Бажанов. – М.: Издательство «Канон+», 2013. – 303с.
17. История техники /А.А. Зворыкин, Н.И. Осьмова, В.А.Чернышев, С.В. Шухардин; Под ред. Ю.К. Милонова. – М.: Соцэкгиз, 1962. – 576 с.
18. Камардин И.Н. Развитие техники в древнем мире: Учебное пособие по дисциплине «История техники». – Пенза, 2006. -72 с.
19. Кириллин В.А. Страницы истории науки и техники. – М.: Наука, 1989. – 494 с.
20. Крайнев А.Ф. Искусство построения машин и сооружений с древнейших времен до наших дней. - М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 248 с.
21. Крайнев А.Ф. Техника и технологии в историческом и логическом развитии. – М.: Издательский дом «Спектр», 2009. – 576 с.
22. Криворучно Д.В. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография / Д.В. Криворучко, В.А. Залого ; под общ. Ред. В.А. Залого. – Сумы: Университетская книга, 2012. – 496 с.
23. Мелешенко Ю.С. Техника и закономерности ее развития. – Л.: Лениздат, 1970. –248 с.



24. Пикалов А.А. Особенности разделки отверстий в смешанных пакетах КМ-Ti-Al. - Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т.14, №4(2), 2012. – 782 с.
25. Пикалов А.А. Применение роботизированных систем при сборке авиационных конструкций, содержащих смешанные пакеты КМУ-Ti-Al. - Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т.16, №1(5), 2014. – 1659 с.
26. Техника в ее историческом развитии. От появления ручных орудий труда до становления техники машинно-фабричного производства / Отв. ред. С.В. Шухардин. – М.: Наука, 1979. – 416 с.