

Министерство высшего и среднего специального  
образования РСФСР

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С.П.Королева

Ю.Д.Лысенко

✓

ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ МЕТОДОВ КЛЕЙКИ  
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОРЕСУРСНЫХ ЗАКЛЕПОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом института  
в качестве  
учебного пособия

Куйбышев 1985

Лысенко Ю.Д. Применение импульсных методов клепки для получения высокоресурсных заклепочных соединений: Учебное пособие. - Куйбышев: КуАИ, 1985, с. 56.

В учебном пособии показано, что высокую усталостную прочность заклепочного соединения обеспечивает диаметральный натяг заклепки в отверстии. Дан обзор методов клепки и оборудования, обеспечивающих высокий натяг. Рассмотрены конструкции ручных машин для одноударной клепки, а также особенности технологии образования заклепочного соединения за один удар. Даны перспективы применения и пример расчета режимов работы магнитно-импульсных клепальных устройств.

Пособие предназначено для студентов самолетостроительных и моторостроительных факультетов.

Ил. 20, табл. 2, библиогр. - 16 назв.

Рецензенты: В.Д.Аксютин, В.Б.Юдаев

При производстве изделий из легких сплавов основным видом неразъемного соединения до настоящего времени является клепка. Особенно широкое применение она находит в производстве летательных аппаратов, где к заклепочным соединениям предъявляются высокие требования по прочности — статической и динамической, герметичности и другим показателям.

Повышение качества заклепочных соединений связано с применением новых типов заклепок, технологических процессов клепки и новых видов оборудования. В то же время значительный объем (до 50%) клепально-сборочных работ осуществляется в настоящее время с помощью пневматических клепальных молотков, приемы работы которыми, равно как и их конструкция, за последние 40—50 лет не претерпели существенных изменений. В течение всего этого времени сохраняются и связанные с этим неприятные последствия, в первую очередь, профессиональные заболевания.

Развитие техники в последние годы привело к появлению и все более широкому применению источников энергии высокой мощности, что позволило создать новые виды оборудования и машин, в том числе импульсных молотков для выполнения клепально-сборочных операций.

Это тем более важно, что в настоящее время с особой остротой встает вопрос о необходимости широкой механизации и автоматизации клепально-сборочных процессов. Отечественный и зарубежный опыт позволяет считать, что легкие и компактные автоматические, в том числе и роботизированные клепальные устройства, могут быть созданы

только на базе безвибрационного ударного привода. В первую очередь, такие устройства необходимы для обеспечения стапельной сборки, где выполняется наибольший объем ручной многоударной клепки.

Однако широкое применение импульсных молотков и машин с рабочими органами на их основе требует проведения комплексных исследований по отработке новой технологии клепки и выявлению ее влияния на эксплуатационные характеристики заклепочных соединений и, в первую очередь, на их ресурс.

Литературы, освещающей эти вопросы, очень мало и она не систематизирована. Поэтому данная работа имеет целью восполнить этот пробел и дать возможность студентам познакомиться с технологическими процессами, обеспечивающими получение высокоресурсных заклепочных соединений, и особенностями одноударной клепки на примере магнитно-импульсной.

# І. ВЫСОКОРЕСУРСНЫЕ ЗАКЛЕПОЧНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ И МЕТОДЫ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

---

## І.І. Требования, предъявляемые к заклепочным соединениям

Современный летательный аппарат является весьма сложной конструкцией, отвечающей требованиям аэродинамики, прочности, герметичности и многим другим при самых жестких ограничениях массы. Сборка деталей, узлов и агрегатов с помощью заклепок ставит, в свою очередь, требования обеспечения технологичности конструкции: максимально возможное использование стационарного и переносного клепального оборудования, прессов, автоматов, скоб и т.п., удобство подхода к зоне клепки, сокращение номенклатуры заклепок и др.

Высокое качество заклепочных соединений обеспечивает стационарное оборудование. Тем не менее в силу различных причин до 40% заклепок расклепывается вручную пневматическими многоударными молотками, создающими вибрацию и значительный шум при работе, что приводит к профессиональным заболеваниям клепальщиков, а каждый случай виброболезни наносит государству ущерб в 10 000 р. /1/. Усугубляющими факторами при этом являются охлаждение кистей рук протекающим по корпусу молотка воздухом и необходимость прикладывания значительного статического усилия (150-180 Н) для удержания молотка в рабочем положении. Качество клепки при этом в решающей степени зависит от квалификации рабочего и может быть невысоким. К этому следует добавить, что по условиям охраны труда ручная клепка применяется, как правило, для заклепок диаметром не свыше 6 мм. При больших диаметрах обычно применяется более тяжелый и дорогой крепеж - болты, болт-заклепки, спецзаклепки.

Заклепочные соединения подвержены воздействию значительных усилий как статических, так и циклических, поскольку летательные аппараты работают в условиях сильных вибраций. Поэтому к ним предъявляются высокие требования по герметичности и стойкости к влиянию климатических воздействий, возникновению фреттинг-коррозии и др.

Многолетняя практика эксплуатации отечественной и зарубежной техники показывает, что долговечность конструкции планера самолета ограничена усталостными разрушениями, 75-85% которых приходится на болтовые и заклепочные соединения. Избежать аварий и катастроф по этим причинам позволяют статическая неопределенность самолетных конструкций и применение материалов, обладающих свойством медленного распространения трещин. Представителями таких материалов являются сплавы группы *Al-Cu*, в частности, сплав Д16Т.

Таким образом, проблема повышения экономической эффективности, качества и надежности самолетов, особенно больших транспортных, связана с задачей повышения надежности и ресурса болтовых и заклепочных соединений.

### 1.2. Основные факторы, влияющие на долговечность соединений

Факторы, влияющие на распределение величины концентрации напряжений, а значит, и долговечность элементов конструкции, можно условно разделить на три группы:

металлургические (химсостав, величина зерна, различного рода дефекты и др.);

конструктивно-технологические (конструктивные факторы - форма, геометрические соотношения и сочетание материалов элементов соединений, тип крепежа; технологические факторы - режимы технологического процесса при выполнении операций, сочетание переходов и операций, оборудование, инструмент);

эксплуатационные (характер и величина внешней нагрузки, температуры, среды и др.).

Первостепенное значение имеют конструктивно-технологические факторы, определяющие уровень параметров соединения, непосредственно влияющих на усталостную прочность соединения. Эти параметры определяют величину и знак остаточных напряжений, глубину их залегания, чистоту поверхности и степень ее деформационного упрочнения, величину сил трения по контактным поверхностям. Задачей является получение соединений, у которых эти параметры были бы наилучшими с точки зрения ресурса и надежности соединений.

Эксплуатационные факторы, как правило, учитываются при оценке влияния металлургических, конструктивно-технологических факторов на качество, прочностные и усталостные характеристики, герметичность, коррозионную стойкость элементов конструкции, включая соединения.

## 1.2.1. Конструктивные факторы

Увеличение выносливости соединений за счет конструктивных изменений, как правило, приводит к увеличению веса элементов. Естественно, это нежелательно и приемлемо лишь в тех случаях, когда сравнительно небольшие конструктивные изменения могут дать существенное увеличение выносливости, например, в химически травленных или фрезерованных панелях и т.п.

Оценка конструктивного совершенства с точки зрения эффективности соединения при статической прочности на срез выражается коэффициентом прочности шва [2/

$$\eta = \frac{\sigma_{разр}^c}{\sigma_B},$$

где  $\sigma_{разр}^c$  — разрушающее напряжение в ослабленном сечении;  
 $\sigma_B$  — предел прочности материала при растяжении.

Коэффициент прочности шва определяется диаметром крепежного элемента, расстоянием между соседними крепежными элементами в шве, между рядами и т.п. Одним из основных конструктивных факторов, существенно влияющих на выносливость, особенно односрезных соединений, является толщина листа, вызывающая эксцентриситет сил, действующих в соединении.

Снижение усталостной прочности заклепочных соединений при действии переменных нагрузок происходит от концентрации напряжений в зоне отверстий и уменьшения площади сечения детали, его можно характеризовать коэффициентом концентрации напряжений [3/

$$K = \frac{\sigma_{\theta}^{макс}}{\sigma_{\theta H}},$$

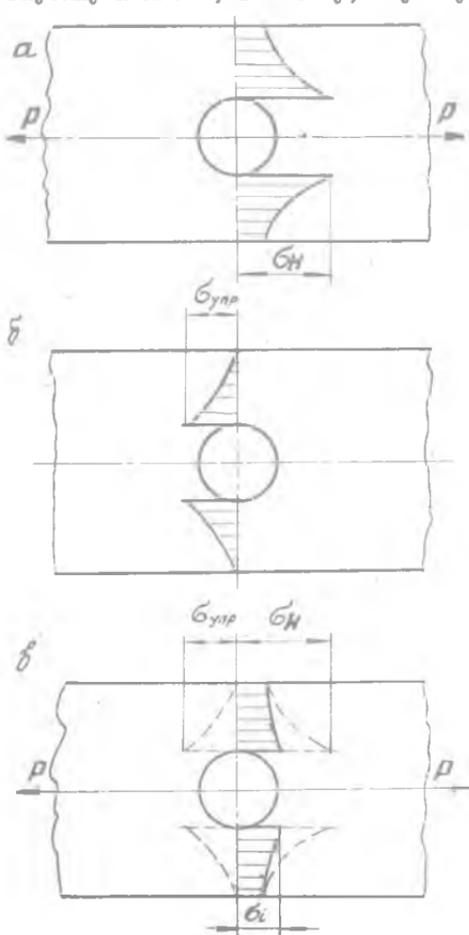
где  $\sigma_{\theta}^{макс}$  — максимальное растягивающее напряжение в сечении от действия внешней нагрузки;  $\sigma_{\theta H}$  — среднее (номинальное) напряжение в ослабленном сечении.

Степень концентрации напряжений зависит не только от диаметра отверстий и расстояния между ними, но и от способа получения отверстия, обработки его поверхности и прилегающей к нему, способа клепки, т.е. от технологических факторов.

## 1.2.2. Технологические факторы

Достоинством технологических методов повышения выносливости соединений является отсутствие необходимости конструктивных изменений, и, следовательно, увеличения веса конструкции. Технологические факторы можно разделить, в свою очередь, на две группы.

Первая группа, включающая инструмент, способы, режимы образования и обработки, связана с образованием отверстий под заклепки. Она определяет параметры, характеризующие состояние поверхностного слоя — степень шероховатости; направление гребешков шероховатости; степень и глубину наклепа; величину, глубину и знак остаточных напряжений.



Пластическая обработка поверхности отверстия, кромок отверстия, поверхности деталей приводит к повышению выносливости соединений. Обработка отверстий в алюминиевых сплавах дорнированием или раскатыванием увеличивает микротвердость на 30-40%. Изменения напряженного состояния вокруг дорнированного отверстия показаны на рис. 1 [2]. Величина возникающих напряжений характеризуется параметром  $\Delta_H$  — величиной натяга, определяемой в процентах по отношению к номинальному диаметру  $d_0$  отверстия до обработки:

$$\Delta_H = \frac{D_K - d_0}{d_0},$$

где  $D_K$  — диаметр отверстия после обработки.

Р и с. 1. Напряжения вокруг дорнированного отверстия в образце: а — напряжения от нагружения; б — напряжения от упрочнения; в — суммарное напряжение от упрочнения и нагружения

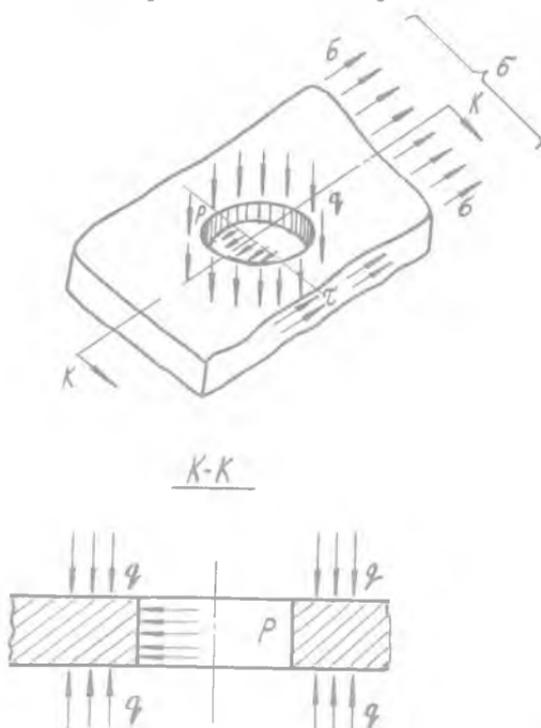
Вторая группа технологических факторов связана с операцией клепки, которая сопровождается пластическим деформированием материала деталей от радиального натяга  $\Delta_H$ .

Следует отметить значительную неравномерность распределения натяга по толщине пакета при клепке. В сечениях со стороны закладной головки натяг в несколько раз меньше, чем в сечениях у замыкающей головки, особенно для потайных соединений в пакетах толщиной  $\sigma$  более одного диаметра стержня заклепки, т.е.  $\sigma > d$ . Для предотвращения этого явления предлагаются различные решения, позволяющие выравнивать натяг по толщине пакета и значительно увеличить его (они будут рассмотрены в разд. I.4).

### I.3. Причины повышения усталостной прочности соединения с натягом

Причины повышения усталостной прочности соединения от натяга на качественном уровне могут быть выявлены рассмотрением напряженного состояния материала в зоне отверстия и картины взаимодействия элементов соединения при нагружении переменными нагрузками.

Если в выделенном одиночном соединении заменить напряжения действие отброшенных частей, то можно представить пластину с отверстием в виде, показанном на рис. 2 (для симметричного соединения типа двусрезного). В пределах упругих деформаций справедлив принцип суперпозиции и совокупность воздействия внешних сил может быть представлена как сумма воздействия каждой из нагрузок: сил давления стержня крепежного элемента на стенку отверстия, усилия сжатия



Р и с. 2. Нагрузки, действующие в зоне отверстия усталостно-слабого элемента соединения - пластины

пакета (силы трения для упрощения картины учитывать не будем). Учитывая быстрое затухание возмущений напряжений при удалении от концентратора напряжений — отверстия, выделенный элемент представим в виде бесконечной пластины с отверстием. Напряжение от давления стержня на стенку отверстия представим как равномерно распределенное по толщине листа.

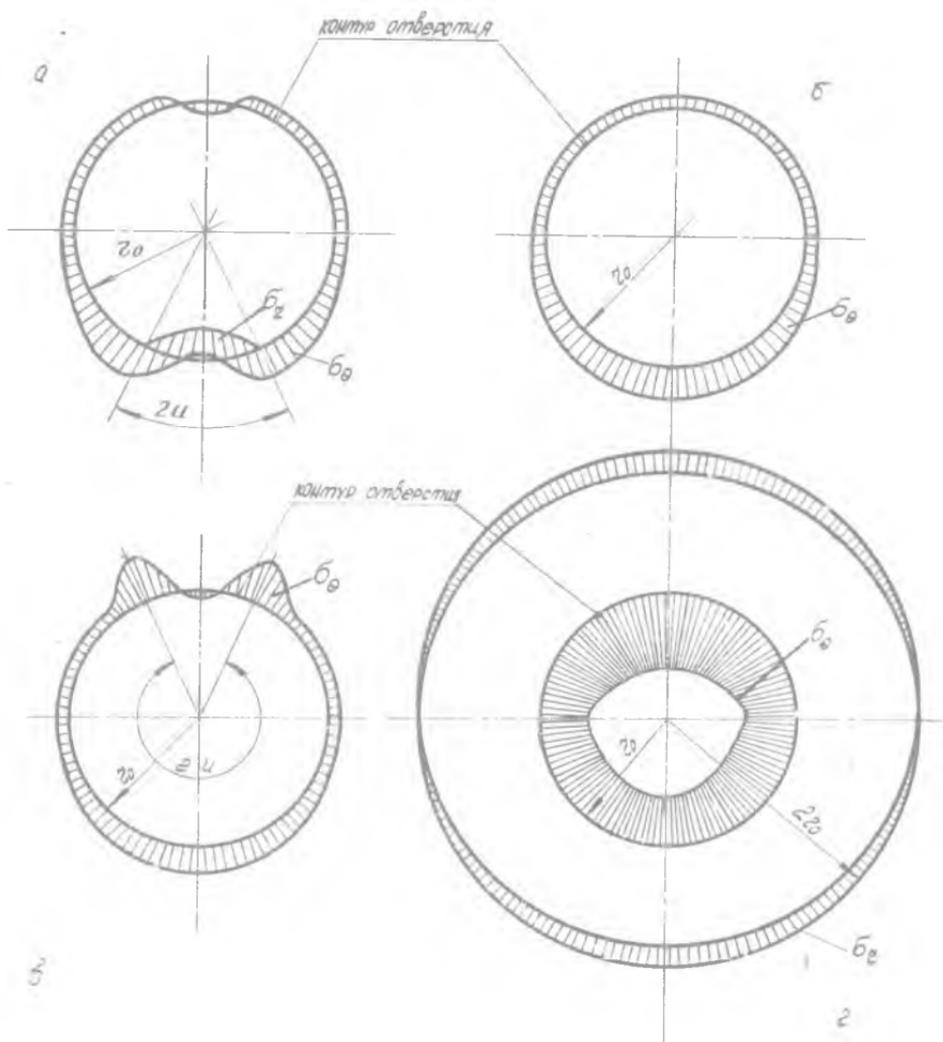
Для случая свободной посадки стержня в отверстие распределение по контуру отверстия радиальных  $\sigma_r$  и тангенциальных  $\sigma_\theta$  напряжений показано на рис. 3,а, где вовнутрь контура отложены сжимающие напряжения. Происходит резкое возрастание нагрузки на границе угла контакта  $2\alpha$  стержня со стенкой отверстия. Радиальные напряжения  $\sigma_r$  на контуре равны давлению стержня на стенку. По мере увеличения внешней нагрузки угол контакта увеличивается, но концентрация напряжений в зоне отверстия изменяется незначительно.

Для случая, когда стержень поставлен в отверстие с упругим радиальным натягом, распределение напряжений показано на рис. 3,б. Отличие от предыдущего случая сохраняется лишь до момента раскрытия стыка, т.е. когда под действием возрастающей внешней нагрузки произойдет разрыв кругового контакта между стержнем и стенкой отверстия. В результате появится местный зазор и картина напряжений будет такой, как на рис. 3,в.

При больших радиальных натягах на поверхности отверстий тангенциальные напряжения становятся сжимающими. Если условно наложить на эпюру напряжений от действия внешних сил без натяга эпюру напряжений с большим натягом, то получится эпюра напряжений, приведенная на рис. 3,г. Может оказаться такое соотношение напряжений от внешней нагрузки и радиального натяга, что максимальные тангенциальные напряжения будут не на кромке отверстия, а несколько удалены от нее.

В соединениях с натягом при действии переменных нагрузок происходит уменьшение амплитуд напряжений по сравнению с соединением, не имеющим натяга. В результате уменьшается концентрация напряжений и увеличивается долговечность соединения.

Уменьшение амплитуд напряжений объясняется тем, что в том случае, когда под действием внешней нагрузки не происходит образования зазора между заклепкой и стенкой отверстия, схема работы соединения изменяется по сравнению со случаем посадки с зазором. Угол контакта при этом составляет  $2\alpha = 360^\circ$ . Нагрузка от стержня на стенку отверстия передается поэтому не только за счет увеличения давления на одной стороне отверстия, но и за счет уменьшения контактных радиальных напряжений натяга на другой стороне, т.е. при  $\alpha > 90^\circ$ . В результате



Р и с. 3. Картина тангенциальных и радиальных напряжений на контуре и в зоне отверстия: а - при давлении стержня почти одинакового радиуса с отверстием, т.е. при посадке с зазором; б- при упругом радиальном натяге; в - при раскрытии стыка по контуру отверстия под действием упругого натяга; г - при действии внешней нагрузки и пластическом натяге

уменьшаются и величина амплитуд давления на стенку отверстия, и величина нагрузки, передаваемой через минимальное сечение соединяемой детали, за счет исключения доли нагрузки, приходящейся на часть угла контакта  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ . При достаточно малой величине натяга и, соответственно, достаточно большой величине нагрузки в соединении на протяжении части цикла будет образовываться зазор между стенкой отверстия и стержнем заклепки, что в реальной ситуации зачастую имеет место в зоне соединения под закладной головкой заклепки. Характер напряженного состояния при этом будет промежуточный между рассмотренным случаем и посадкой с зазором. При малом значении натяга его влияние на изменение напряженного состояния может быть оценено следующим образом.

В соединении с зазором максимальное значение тангенциального напряжения согласно (1.2) составляет  $\sigma_\theta^{\text{макс}} = K\sigma_{\theta H}$ , а минимальное значение  $\sigma_\theta^{\text{мин}} = 0$ .

Амплитуда напряжений

$$\sigma_{\theta I}^a = \frac{1}{2}(\sigma_\theta^{\text{макс}} - \sigma_\theta^{\text{мин}}) = \frac{1}{2} K\sigma_{\theta H} = K\sigma_{\theta H}^a,$$

где  $\sigma_{\theta H}^a$  — амплитуда напряжений от внешней нагрузки в ослабленном сечении.

При малом натяге, когда под нагрузкой появляется местный зазор, можно считать, что  $\sigma_\theta^{\text{макс}}$  будет такое же, как при посадке без натяга. Однако минимальное значение тангенциальных напряжений не равняется нулю и составляет  $\sigma_\theta^{\text{мин}} = \sigma_\theta^H$ , где  $\sigma_\theta^H$  — тангенциальные напряжения, обусловленные натягом и пропорциональные его величине. Максимальная амплитуда тангенциальных напряжений будет

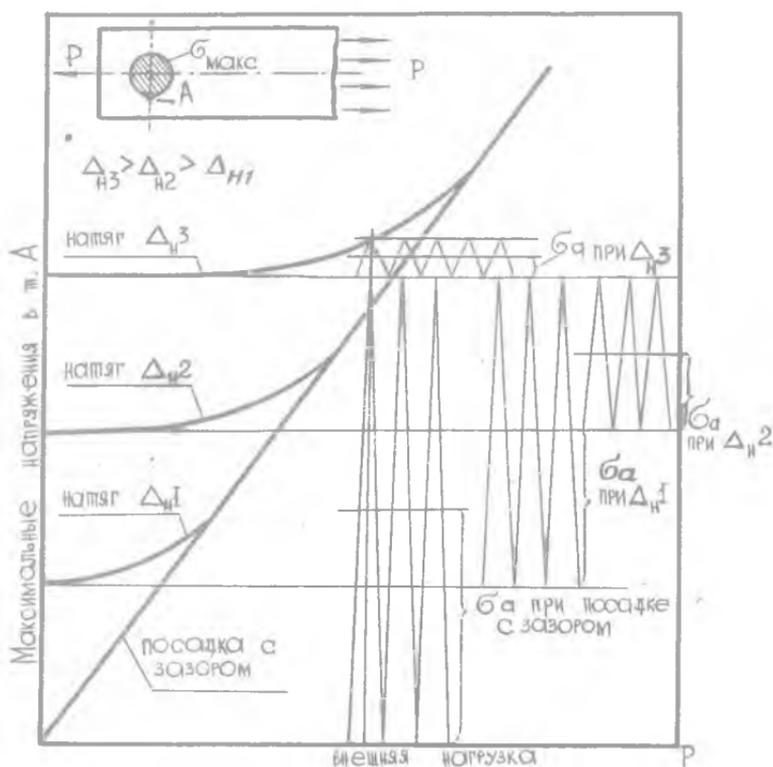
$$\sigma_{\theta II}^a = \frac{1}{2}(\sigma_\theta^{\text{макс}} - \sigma_\theta^{\text{мин}}) = \frac{1}{2}(K\sigma_{\theta H} - \sigma_\theta^H) = K\sigma_{\theta H}^a - \frac{1}{2}\sigma_\theta^H.$$

Следовательно, амплитуда напряжений уменьшается на величину  $1/2 \sigma_\theta^H$ , а коэффициент концентрации напряжений уменьшается и будет

$$K' = \frac{\sigma_{\theta II}^a}{\sigma_{\theta H}^a} = K - \frac{1}{2} \frac{\sigma_\theta^H}{\sigma_{\theta H}^a}.$$

Таким образом, снижение концентрации напряжений пропорционально величине напряжения натяга  $\sigma_\theta^H$ . Рассмотренная связь вели-

чины натяга с амплитудой и максимальными значениями напряжений в соединении согласуется с экспериментальными данными (рис. 4) /4/. Та-



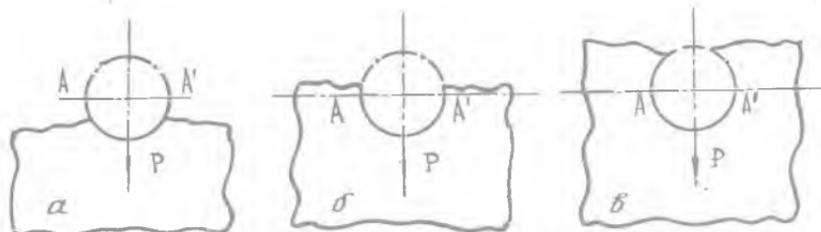
Р и с. 4. Принципиальная схема взаимодействия посадки штифта в отверстие и амплитуды напряжений в опасном сечении пластины

кая картина наблюдается вплоть до значений натяга, при которых под нагрузкой не будет образовываться местный зазор, т.е. контактные радиальные напряжения будут больше, чем уменьшение давления на стенку в случае  $2\omega = 360^\circ$ .

Коэффициент концентрации напряжений при этом снижается до своего минимального значения и теоретически при дальнейшем увеличении натяга не изменяется.

Изменение характера напряженного состояния при применении посадки с натягом подтверждается изменением характера разрушения заклепоч-

ных соединений (рис.5). Смещение мест образования усталостных трещин свидетельствует об уменьшении концентрации напряжений (рис.3а,в), а также о связи места начала усталостного разрушения с границей зоны контакта.



Р и с. 5. Вид разрушения в зоне отверстия при различном натяге в соединении: а - посадка с зазором; б - посадка с небольшим натягом; в - посадка с пластическим натягом

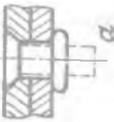
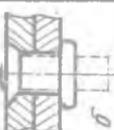
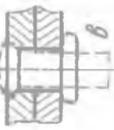
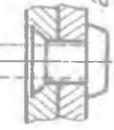
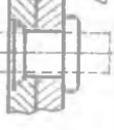
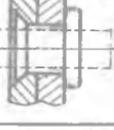
Итак, основным направлением повышения выносливости соединений технологическими методами следует считать создание остаточных сжимающих напряжений в зоне отверстия.

#### 1.4. Способы обеспечения высокого радиального натяга в заклепочных соединениях

Для повышения ресурса клепаных конструкций главным образом за счет создания в пакете повышенного радиального натяга, равного 2-5%, разработаны заклепки с компенсаторами, способы клепки с образованием потайной замыкающей головки и клепки стержнями, повышенным давлением и ряд других [5]. Особое внимание при этом уделялось получению высоко-ресурсных потайных заклепочных соединений.

Как правило, при обычной клепке с потайной закладной головкой заклепки радиальный натяг возникает только у стержня рядом с замыкающей бочковидной головкой и, быстро уменьшаясь, исчезает (особенно при многоударной клепке), зачастую не доходя до плоскости соприкосновения деталей (табл.1, а).

Так как в самолетных конструкциях потайные заклепки применяют и для сравнительно тонких обшивок (1,0-2,0),зенковка гнезда под головку потайной заклепки в этом случае занимает почти всю толщину листа и в обшивке заклепка практически полностью находится без натяга. Это одна из главных причин того, почему усталостные разрушения у заклепочных соединений начинаются с обшивки. В то же время сам факт начала

| Виды соединений и значения их характеристик   |  |   |   |  |  |  |
|---|--|---|---|--|--|--|
| <p>Основные характеристики заклепок обычных соединений и способы их получения</p> <p>Устойчивость долбежности (<math>K=0,5</math>)</p> <p>Всплывание отверстий Клейса</p> <p>Добойка</p> <p>Характер дырчатости по высоте пакета</p> <p>Возможный характер разрушения</p> |  <p>заклепка<br/>обычная</p> |  <p>с промежуточ-<br/>ной стержень</p> |  <p>"Локхид"</p> |  <p>ПЭГ</p> |  <p>К30</p> |  <p>е</p> |
|   | 100%   | 500%  | 700%  | 800%   | 1000%  | 1200%  |
|   | сбегание, не<br>однородная (О)<br>не тянется (Н)<br>крупная зазор  | С, Н12<br>О+группа (П)<br>тянется (Т)   | С, Н12<br>О+Г<br>Т  | С, НН<br>О+Г<br>Т  | С, НН<br>О+Г<br>Т  | С, НН<br>О<br>Т  |
|   |                              |                                        |                  |             |             |           |
|   | по обрывке   | по обрывке  | по обрывке  | по камусу  | по обрывке   | по обрывке   |

разрушения снаружи, со стороны, доступной ежедневному осмотру, является положительным с позиции надежности конструкций, работающих при наличии повреждения. Отсутствие натягов головки заклепок в обшивке требует при герметичной клепке внутривойлочной герметизации, что резко усложняет и удлиняет цикл сборки, приводит к дополнительному утяжелению конструкции.

Таким образом, наряду с натягом, создаваемым в отверстии стержнем заклепки, необходимо обеспечить натяг в зоне потайной головки заклепки.

#### 1.4.1. Клепка заклепками с компенсатором

Клепка заклепками с компенсатором является достаточно простым и технологичным способом получения высокого натяга в заклепочных соединениях. При клепке по этому способу используется заклепка с компенсатором. Компенсатор имеет вид бугорка или иной формы выступа, расположенного на торцевой поверхности закладной головки заклепки. В процессе клепки компенсатор внедряется в закладную головку и действует подобно клину, вызывая радиальное течение материала в закладной головке, особенно в потайных заклепках и прилегающей зоне стержня заклепки, что обеспечивает более равномерный натяг по толщине пакета и улучшает как выносливость, так и герметичность соединения.

Форма и размеры компенсатора выбираются таким образом, чтобы сохранить усилие расклепывания в пределах, обусловленных обычной клепкой, и в то же время обеспечить необходимую величину натяга. Проведенные испытания показали, что при применении заклепок с компенсатором выносливость соединений повышается в 5-6 раз по сравнению с соединениями, склепанными обычными заклепками (см. табл. 1, б).

В ходе исследований и опытно-промышленной проверки было установлено, что требования к точности изготовления отверстий под заклепки с компенсатором соответствуют действующим стандартам, а клепка такими заклепками может быть осуществлена на прессах КП-602, КП-503 и т.п.

В настоящее время заклепки с компенсатором успешно применяются на самолетостроительных предприятиях как в СССР, так и за рубежом, например, (табл. 1, в), заклепка  $\alpha$  -1005 (нормаль фирмы "Локхид").

Однако наряду с перечисленными преимуществами, клепка заклепками с компенсаторами имеет и ряд недостатков: при клепке толстых пакетов (более 1,5 диаметра заклепок) не удается достигнуть равномерного распределения натяга по толщине пакета и обеспечить герметич-

ность соединения: не обеспечивается достаточно стабильное качество соединений при клепке ручным инструментом.

#### 1.4.2. Клепка с образованием потайной замыкающей головки

Сущность способа клепки с образованием потайной замыкающей головки (ПЗГ) заключается в том, что заклепка с полукруглой или плоской закладной головкой устанавливается со стороны цилиндрической части отверстия, а потайная замыкающая головка образуется из стержня заклепки путем его осаживания в зенкованную лунку отверстия. Выступающая над поверхностью лунки часть потайной замыкающей головки удаляется механической обработкой, за счет чего дополнительно улучшается качество внешней аэродинамической поверхности (см.табл.1,г).

Способ клепки ПЗГ позволяет также: повысить герметичность и долговечность заклепочных соединений за счет более качественного заполнения цилиндрической части отверстия и создания более равномерного по толщине пакета натяга, а также устранения зазора под потайной головкой и создания натяга в этой зоне; более широко использовать прямой метод клепки, так как инструмент располагается со стороны обшивки.

Испытания соединений показали, что они обладают повышенными прочностными характеристиками по сравнению с выполненными по способу обратной клепки потайными заклепками: статическая прочность на срез возрастает на 5-7%; предельная величина напряжений смятия в соединениях с ПЗГ выше в 1,5-2 раза; выносливость при срезе выше в 1,5-3,7, а при отрыве в 1,3-2 раза.

Однако, следует отметить, что способ клепки с ПЗГ рекомендуется применять только в тех случаях, когда нагруженная обшивка после зенкования имеет цилиндрическую часть отверстий не менее 25% от толщины обшивки. При более глубокой зенковке обшивка при клепке сильно коробится и теряет герметичность. По этой причине нельзя рекомендовать клепку ПЗГ для тонких обшивок, например, для герметичного фюзеляжа с толщиной обшивки 1,2-1,5 мм.

Экспериментально установлено, что наиболее полно удовлетворяет условиям прочности и технологичности лунка под потайную замыкающую головку в виде двойного конуса: угол основного конуса  $80^{\circ}$  при высоте  $0,25a$  и вспомогательного конуса  $20^{\circ}$  при высоте  $0,15a$ . Поэтому толщина листа, в котором формируется ПЗГ, должна быть не меньше половины диаметра стержня заклепки.

Широкое применение клепки по способу ПЗГ в настоящее время сдерживается также тем, что при этом требуется специальная доводка клепальных прессов, например, предъявляются повышенные требования к обеспечению параллельности рабочих поверхностей штампов. Нарушение этого условия ведет к так называемому "завалу" стержня заклепки. А сами штампы должны иметь насечку на рабочей части обжимки и упоры с фторопластовыми пластинами, служащими для предотвращения отпечатков на поверхности обшивки. По этой же причине практически невозможно осуществлять стабильную клепку по способу ПЗГ клепальными пневмомолотками. Определенные затруднения вызывает и процесс фрезерования выступающей части потайной замыкающей головки, так как объем этой части достаточно велик.

Кроме того, клепка ПЗГ, как и клепка заклепками с компенсатором, оказывается недостаточно эффективным способом получения высокого натяга при клепке толстых пакетов, с которыми в последние годы все чаще приходится иметь дело.

На большой толщине пакета при расклепывании только со стороны замыкающей головки можно обеспечить существенный диаметральный натяг при прессовой клепке примерно на глубину 2,5 мм при диаметре заклепки 4 мм. Таким образом, при клепке с ПЗГ толстых пакетов ( $\sigma > 2d$ ) возникает опасность перехода начала разрушения на каркас, где трещину очень трудно обнаружить. В связи с этим клепка с ПЗГ используется в настоящее время исключительно при клепке стержнями, когда одновременно формируются обе головки.

#### 1.4.3. Клепка стержнями

Клепка стержнями является одним из наиболее эффективных способов получения заклепочных соединений с высоким и равномерным по толщине пакета натягом.

Сущность ее заключается в том, что в отверстие вставляется гладкий цилиндрический стержень, а затем производится его осадка одновременно с двух сторон с образованием потайных или выступающих замыкающих головок (см. табл. I, д).

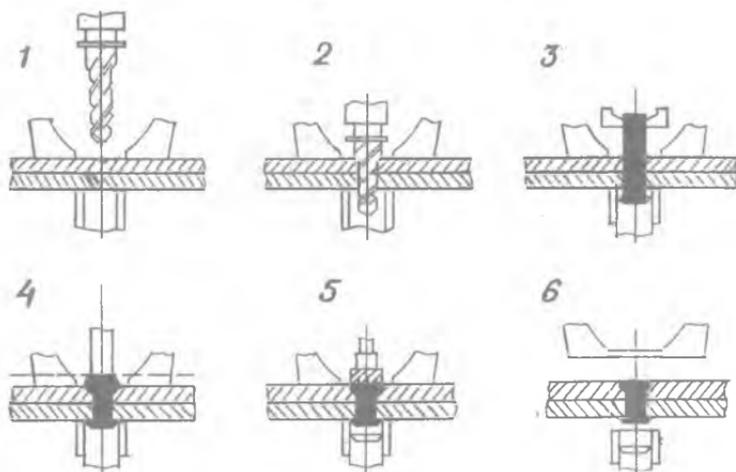
Так как в процессе осадки образуются фактически две замыкающие головки, то в результате создаются благоприятные условия для реализации высокого, равномерного натяга по всей толщине пакета, т.е. и в обшивке, и в каркасной детали одновременно.

Впервые стержни-заклепки, а также автоматическое оборудование для их постановки были предложены фирмой "Джемкор" / 3, 6/. В настоя-

щее время стержни-заклепки получили достаточно широкое применение при сборке самолета на фирмах "Боинг" и "Дуглас".

При правильной технологии расклепывания стержней усталостное разрушение может начаться с обшивки при резком увеличении (по сравнению с обычной клепкой) числа циклов до повреждения. Для максимального увеличения долговечности необходимо, чтобы на стыке обшивки и каркаса заклепка создавала натяг не менее 0,7% от диаметра заклепки, что соответствует напряжению от натяга примерно на уровне предела пропорциональности.

Особенностью клепальных автоматов фирмы "Джемкор" является то, что перед клепкой вокруг будущего отверстия создается мощное сжатие пакета I (рис.6), которое не снимается до окончания всего цикла клепки, включающего следующие операции:



Р и с. 6. Схема клепки стержнями на клепальном прессе-автомате с ЧПУ

2 - сверление и зенкование отверстия, отвод инструмента; 3 - вставка стержня (верхний плунжер перемещается вниз, а нижний - вверх, чтобы начать расклепывание); 4 - одновременное формирование замыкающей головки - в результате перемещения вверх нижней обжимки и потайной головки - вследствие перемещения вверх обрабатываемой панели; 5 - подвод инструмента для зачистки, зачистка потайной головки и отвод инструмента; 6 - отвод прижимов и перемещение панели в следующую рабочую позицию по программе. Эта особенность технологического процесса клепки позволяет избежать образования заусенца на стыке скле-

пываемых деталей (а, следовательно, исключить разборку пакета для снятия заусенцев) и появления фреттинг-усталости. Запрограммированное изменение скорости подачи в момент начала и конца сверления исключает появление заусенца на входе и выходе сверла-зенковки.

Отсутствие в СССР подобных автоматов для клепки стержней привело к необходимости создания технологии клепки стержней на существующих клепальных прессах. Для этой цели были созданы специальные штампы и разработаны варианты заклепок типа "Стержень" - УЗ и СКН. В этом случае сначала производится образование отверстий, например, на сверлильно-зенковальной установке (СЗУ), затем вставляются заклепки и на прессе с помощью специального штампа образуется соединение, после чего фрезеруются потайные головки.

Естественно, что для данного способа непригоден и существующий ручной ударный инструмент.

#### 1.4.4. Клепка повышенным давлением

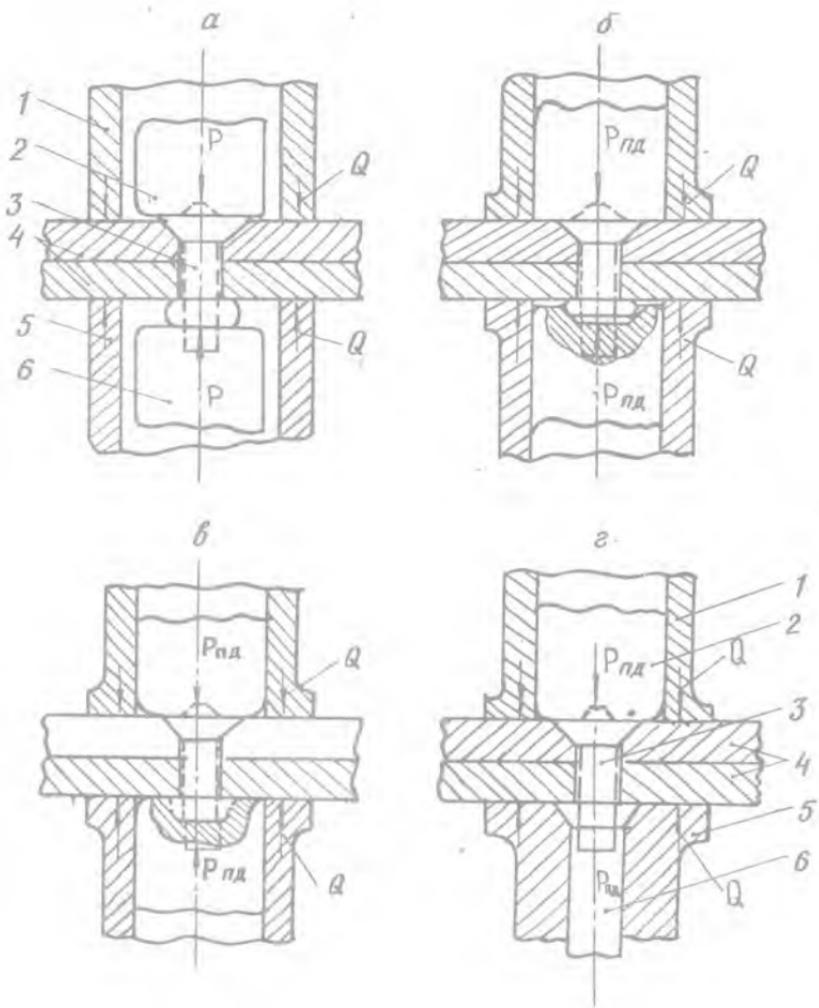
Клепка повышенным давлением включает в себя ряд способов, основанных на создании при образовании замыкающей головки заклепки усилий, значительно превышающих усилия, необходимые для обычной клепки [5].

К этому виду следует отнести следующие способы клепки [рис. 7]: полустесненная осадка заклепок; полустесненная двусторонняя осадка заклепок; осадка заклепок в замкнутом объеме.

Два первых способа клепки позволяют получать в соединениях гарантированный натяг величиной до 10%, а способ клепки в замкнутом объеме - до 20%, причем натяг обеспечивается и при клепке пакетов толщиной более  $1,5d$ . Рассмотрим более подробно предельный случай клепки повышенным давлением - клепку в замкнутом объеме (КЗО) (табл. I, е).

Клепка в замкнутом объеме является наиболее эффективным способом обеспечения натяга на уровне 5-10%, практически равномерно распределенного по всей толщине пакета, составляющей  $1,5d$  и более. Схема выполнения соединений этим способом представлена на рис. 7, г.

Характерной особенностью способа КЗО является достижение такого момента, когда заклепка в процессе осадки полностью заполняет объем, образованный обжимкой, отверстием пакета, прижимом и подвижным пуансоном. После того как сформирована замыкающая головка, процесс клепки не заканчивается и повышение давления продолжается. Под действием повышенного давления весь объем материала заклепки достигает пластического состояния, создавая давление на элементы, образующие замкнутый объем. Поскольку обжимку, пуансон и прижим можно считать абсолютно жесткими, то возможна лишь радиальная деформация стенок отверстия.



Р и с. 7. Схемы процессов осадки заклепок: а - открытая (существующие способы клепки); б - полустесненная, в - с полным стеснением; г - в замкнутом объеме;  
 1,5 - прижимы с усилием; 2,6 - обжимки; 3 - заклепка;  
 4 - склепываемый пакет;  $P$  - усилие клепки;  
 $Q$  - усилие сжатия пакета

Такая схема процесса клепки обеспечивает гарантированный натяг по всему пакету с максимально применяемыми толщинами — до 4–5 *d* .

К недостаткам процессов клепки повышенным давлением следует отнести: повышенные требования к настройке оборудования; повышение процента брака от "завала" стержня заклепки вследствие увеличения длины стержня заклепки, необходимой для достижения натягов до 10%; трудности применения существующего ручного инструмента.

Способы клепки повышенным давлением позволяют поднять усталостную долговечность в несколько раз, а клепка в замкнутом объеме — в 10 — 12 раз (см. табл. I, e).

### I.5. Машины и оборудование, применяемые для клепки

Образование заклепочного соединения производится прессовым способом или ударом. При прессовой клепке применяют клепальные прессы или автоматы, а при ударной — пневматические клепальные молотки. Прессовая клепка характеризуется тем, что замыкающая головка заклепки формируется при равномерном сжатии стержня со скоростью до 1–2 м/с . Различают одиночную и групповую прессовую клепку. При одиночной клепке за один ход пресса расклепывается одна заклепка, а при групповой — несколько. По эксплуатационному признаку клепальные прессы разделяются на стационарные и переносные.

#### I.5.1. Стационарное оборудование

В промышленности применяется большое количество различных прессов для групповой и одиночной клепки /3,6/. В последние годы все более широкое применение в отечественном машиностроении находят клепальные автоматы, например, серии АК (АК-2, 2-0,5; АК-5,5-2,4 и др.). Автоматы обеспечивают при постоянно сжатом пакете образование отверстия, постановку в него заклепки и формирование замыкающей головки. Отдельные автоматы оснащены фрезерной головкой для зачистки головки заклепки, выступающей над аэродинамической поверхностью пакета.

Автоматы обеспечивают высокое качество заклепочного соединения и производительность до 20 заклепок в минуту.

В случае оснащения автоматов позиционерами с автоматическим управлением они могут обеспечить клепку целых узлов или агрегатов в автоматическом режиме. Так, например, работают автоматы АК16-3, АК35,5-1,2 при клепке панелей.

Наиболее совершенными в настоящее время являются автоматы фирмы "Джемкор" /6/.

Однако в производственной практике пока еще широко используются клепальные прессы, осуществляющие только процесс расклепывания заклепок, установленных в предварительно просверленные отверстия. Сверление отверстий производится на сверлильных станках, сверлильно-зенковальных установках или с помощью ручных сверлильных машин.

Как показал опыт авиационной промышленности, высокое качество заклепочных соединений достигается при клепке не групповой, а одиночной. Причиной тому является более стабильная величина натяга заклепки в отверстиях при одиночной клепке. Поскольку пресс групповой клепки настраивается на высоту замыкающей головки, то все отклонения параметров соединения - диаметров отверстия и стержня заклепки, толщины пакета и длины стержня заклепки, геометрии и глубины зенковки - нивелируются по всей группе одновременно расклепываемых заклепок. В результате при высоком качестве клепки в целом зачастую попадаются заклепочные соединения с недостаточным натягом, характеризующиеся малой герметичностью и низкой усталостной прочностью.

Вследствие этого недостаточная технологическая надежность процесса получения заклепочных соединений может снизить эксплуатационную надежность изделия в целом.

Прессы для одиночной клепки и, в том числе, клепальные автоматы настраиваются на усилие расклепывания, что позволяет обеспечить постоянный натяг во всех соединениях, поскольку колебания вышеупомянутых параметров будут компенсированы за счет объема замыкающей головки заклепки. По указанным причинам в авиационной промышленности прессы для групповой клепки начинают применять для расклепывания не более чем двух заклепок одновременно.

Возможность применения того или иного типа прессы зависит от подходов к месту клепки, диаметра и материала заклепок, размеров узлов и панелей и других конструктивных и технологических факторов /3/.

### 1.5.2. Переносное оборудование

Увеличение объема прессовой клепки достигается усовершенствованием конструкций облегченных ручных прессов путем максимального снижения их массы, обеспечения достаточно высоких усилий и возможности подхода к требуемой рабочей зоне. Переносные прессы в виде скоб (подвесных или ручных) позволяют механизировать процесс и обеспечить

расклепывание заклепок больших диаметров или из высокопрочных материалов. Применяются эти прессы в условиях стапельной сборки или внестапельной доработки узлов и агрегатов, когда клепка на стационарном оборудовании невозможна или нецелесообразна. Конструкции ручных прессов отличаются высокой работоспособностью, небольшой массой, портативностью и удобством в работе. Главными их недостатками можно считать ограничения по вылету скобы и быстрый рост веса скобы с увеличением вылета и усилия прессования. Поэтому в практике редко применяют скобы с вылетом более 300 мм и усилием прессования более 8 т.

Прессовая клепка получила наибольшее распространение в производстве летательных аппаратов, где одним из показателей уровня производства является степень механизации клепальных работ. Это связано с такими достоинствами прессовой клепки, как: высокое качество и стабильность соединений, не зависящие от квалификации исполнителей; высокая производительность; возможность автоматизации процесса; отсутствие влияния вибрации и шума на исполнителей; лучшее качество поверхности заклепочного шва без местных деформаций обшивки; отсутствие забоин и царапин, которые часто возникают при клепке пневмомолотками.

### 1.5.3. Ручные клепальные многоударные машины (молотки)

При сборке узлов и агрегатов, имеющих замкнутые контуры и затрудненный доступ к местам постановки заклепок, в сборочных приспособлениях и на участках внестапельной сборки применяется многоударная клепка пневматическими молотками. При этом в общем объеме клепальных работ при производстве летательных аппаратов ударная клепка составляет от 20 до 50% в зависимости от типа объекта производства и технологичности его конструкции. Достоинством ручной ударной клепки является ее универсальность.

При ударной клепке образование замыкающей головки осуществляется за несколько десятков ударов в течение нескольких секунд со скоростью осаживания на 1-2 порядка большей, чем при прессовой клепке. Во время работы молоток сильно вибрирует, вследствие чего только высокая квалификация клепальщика, его опыт и умение "чувствовать" заклепку могут обеспечить хорошее качество клепки и высокую производительность труда. Немалую роль играет при этом и мастерство подручного, который во время клепки фиксирует заклепку с посошкой поддержки. Характеристики ряда молотков приведены в табл. 2. Форма и габариты поддержки определяются, с одной стороны, конструкцией собираемого изделия, диаметром и материалом заклепки, а с другой - способом клепки, прямым

Т а б л и ц а 2

| Основные<br>технические<br>параметры               | Ед.<br>измере-<br>ния | Характеристики пневматических<br>клепальных молотков |        |        |       |
|--|-----------------------|--|--------|--------|-------|
|  |                       | КМП-14   | КМУ-13 | КМП-24 | КМ-42 |
| Энергия единичного удара                           | кгс/м                 | 0,25   | 0,18   | 0,5    | 1,3   |
| Частота ударов                                     | уд/мин                | 2500   | 2700   | 2200   | 1100  |
| Расход сжатого воздуха                             | м <sup>3</sup> /мин   | 0,3  | 0,35   | 0,45   | 0,75  |
| Диаметр $d$ расклепываемой заклепки из сплава В-65 | мм                    | 4  | 3,5    | 5      | 8     |
| Время расклепывания заклепок:                      | с                     |  |        |        |       |
| для пакета - $1d$                                  |                       | 1,0  | 1,0    | 1,5    | 2,0   |
| для пакета - $2d$                                  |                       | 1,5  | 2,0    | 2,0    | 3,5   |
| для пакета - $3d$                                  |                       | 2,0  | 2,5    | 2,5    | 5,0   |
| Давление сжатого воздуха                           | ати                   | 5  | 5      | 5      | 5     |
| Масса молотка без сменного инструмента             | кг                    | 1,3  | 1,5    | 1,6    | 3,1   |
| Габаритные размеры:                                | мм                    |  |        |        |       |
| длина  |                       | 145  | 152    | 177    | 357   |
| ширина   |                       | 41   | 40     | 46     | 68    |
| высота   |                       | 140  | 90     | 146    | 140   |
| Масса поддержки                                    | кг                    | 2,0  | 1,0    | 3,0    | 6,0   |

Примечание. Метод клепки - обратный.

или обратным, в зависимости от того, с какой стороны по отношению к замыкающей головке находится клепальный молоток.

При прямой клепке поддержка удерживает закладную головку, а молоток формирует замыкающую. Заклепка в начале процесса осаживания выталкивается молотком из отверстия, для обеспечения плотного прилегания закладной головки к пакету поддержка должна быть достаточно массивной. Для выбора ее массы предлагается /3/ эмпирическая формула.

$$m_n = 2d_3^3,$$

где  $m$  - масса поддержки, кг;

$d_3$  - диаметр стержня заклепки, мм.

При обратной клепке поддержка формирует замыкающую головку, а молоток наносит удары по закладной головке и через нее по склепываемому пакету. При каждом ударе пакет смещается в пределах упругой деформации вместе с заклепкой, которая осаживается на поддержке, как на наковальне. Поскольку смещения пакета находятся в пределах  $0,1 - -0,5$  мм, то для оформления замыкающей головки необходимо нанести несколько десятков ударов. Масса поддержки при этом способе клепки может быть значительно меньше, поскольку закладная головка при клепке прижимается молотком к пакету, а смещение поддержки при ударе меньше смещения пакета. Масса поддержки может быть определена из выражения

$$m_n \approx 0,5d_3.$$

Очевидно, что клепка по этому способу может быть только многоударной. Обратная клепка обеспечивает более высокое качество соединений и особенно широко применяется при клепке заклепок с потайной закладной головкой, так как при этом достигается удобство работы клепальным молотком. Поддержку же значительно легче ввести в труднодоступные места или придать ей необходимую форму. Однако работа клепальщика осложняется тем, что момент окончания клепки он вынужден определять интуитивно, на основании своего опыта, что, естественно, сказывается на качестве клепки.

Поскольку работа пневмомолотков сопровождается вибрацией и шумом, то от них по возможности стараются избавиться и заменить прессами и скобами. Вибрация, шум и охлаждение рук пневмоинструментом приводят, как упоминалось выше, к профессиональным заболеваниям, на профилактику которых затрачиваются большие средства. Поиск путей снижения объема виброопасной клепки идет в направлении разработки конструкций заклепок, не требующих ударного инструмента для их постановки, и создания новых видов переносного инструмента прессового действия, например, гидравлических клепальных устройств (ГКУ), пневматических клепальных раскатных устройств (ПКРУ) /6/.

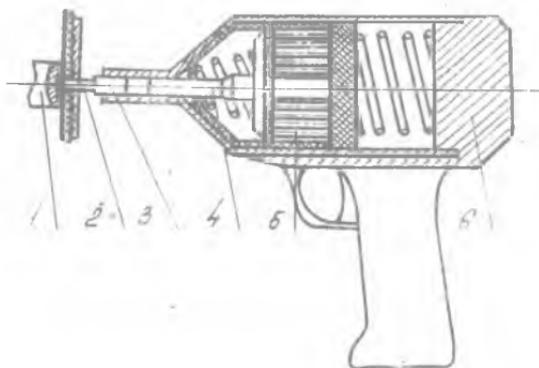
Одним из путей борьбы с профзаболеваниями клепальщиков является разработка и внедрение обладающих пониженными параметрами шума и вибрации ручных и переносных машин для одноударной клепки.

## 2. ОДНОУДАРНАЯ КЛЕПКА

### 2.1. Особенности ручных машин для одноударной клепки

В отличие от рассмотренных выше пневмомолотков, одноударные молотки образуют замыкающую головку за один удар. Таким образом, время клепки и воздействия вибрации и шума на клепальщика существенно сокращается. Перемещение обжимки при образовании замыкающей головки происходит сразу на весь путь деформирования, аналогично прессовой клепке. Очевидно, что одноударная клепка с поддержкой малоприспособна для обратной клепки из-за возможности деформирования склепываемых деталей и является, по существу, прямой. Поскольку влиять на процесс клепки из-за его кратковременности клепальщик уже не может, то его функции сводятся к установке молотка в правильное положение по отношению к заклепке (соосно с ней) и подаче команды на клепку путем нажатия на кнопку или спусковой крючок. Следовательно, для работы одноударными молотками не требуются исполнители высокой квалификации.

Рассмотрим подробнее основные соотношения для процессов в ударном инструменте (рис.8). Для простоты будем считать, что система гашения



Р и с.8. Схема клепки магнитно-импульсным клепальным молотком: 1-поддержка, 2-заклепка; 3-обжимка, 4-боек, 5-индуктор, 6-корпус

отдачи в инструменте отсутствует. Масса инструмента будет складываться из масс обжимки, бойка, корпуса, рукоятки, т.е.

$$m_{\text{и}} = m_{\text{об}} + m_{\text{б}} + m_{\text{к}} + m_{\text{р}}.$$

На поршень (боек) площадью  $S_{\text{б}}$  молотка действует сила давления энергоносителя

$$F_{\text{ЭН}} = P_{\text{ЭН}} S_{\text{б}},$$

где  $P_{\text{ЭН}}$  - давление энергоносителя.

Под действием этой силы боек массой  $m_{\text{б}}$  на пути  $x_{\text{б}}$  запасает кинетическую энергию

$$W_{\text{бк}} = \frac{m_{\text{б}} v_{\text{б}}^2}{2},$$

где  $v_{\text{б}}$  - скорость бойка в конце пути разгона.

После соударения бойка с обжимкой и заклепкой энергия удара перейдет в работу деформации заклепки и пакета:

$$A_{\text{деф}} = \int_0^{x_{\text{д}}} F_{\text{деф}} dx,$$

где  $F_{\text{деф}}$  - сопротивление деформации;  $x_{\text{д}}$  - путь деформации. Обычно путь разгона  $x_{\text{р}}$  намного превышает путь деформации, при этом работа разгона

$$A_{\text{разг}} = \int_0^{x_{\text{б}}} F_{\text{ЭН}} dx$$

равняется кинетической энергии бойка  $W_{\text{бк}}$  и в первом приближении  $A_{\text{деф}}$ . Следовательно, в процессе осаживания заклепки силой давления энергоносителя на боек можно пренебречь.

В процессе разгона бойка та же сила действует и на корпус молотка  $m_{\text{к}} = m_{\text{и}} - m_{\text{б}}$ , вследствие чего он к концу процесса разгона на пути  $x_{\text{к}}$  приобретает скорость  $v_{\text{к}}$  и соответствующую энергию

$$W_{\text{кк}} = \frac{m_{\text{к}} v_{\text{к}}^2}{2}.$$

Полученные соотношения удобнее выразить через импульс силы и суммарную массу инструмента:

$$J = \int_0^t F_{\text{ЭН}} dt = F_{\text{ЭН}} t_{\text{раз}} \approx m_{\text{б}} v_{\text{б}} = (m_{\text{и}} - m_{\text{б}}) v_{\text{к}}.$$

При этом кинетическая энергия бойка  $W_{\text{бк}} = \frac{m_{\text{б}} v_{\text{б}}^2}{2} = \frac{J^2}{2m_{\text{б}}}.$

Кинетическая энергия корпуса молотка

$$W_{кк} = \frac{J^2}{2m_k} = W_{бк} \frac{m_b}{m_k}.$$

Скорость движения корпуса молотка

$$v_k = v_b \frac{m_b}{m_k}.$$

Скорость движения бойка

$$v_b = \frac{J}{m_b}.$$

Перемещение корпуса

$$x_k = x_b \frac{m_b}{m_k}.$$

Работа энергоносителя

$$A_{эн} = F_{эн} x_p = P_{эн} x_p S_b = P_{эн} v_{эн}.$$

Из рассмотрения этих выражений можно сделать следующие выводы:

1. При неизменной скорости бойка и энергии удара энергия, переданная в боек, пропорциональна отношению масс корпуса молотка и бойка, т.е. для получения высокого энергетического КПД процесса необходимо, чтобы масса бойка была много меньше массы корпуса.

2. При неизменной энергии удара величина импульса силы и масса бойка уменьшаются с повышением скорости удара, т.е. при неизменной массе корпуса увеличение скорости удара (и соответствующее уменьшение массы бойка) позволяет уменьшить импульс отдачи.

3. Для сохранения энергии удара  $W_{бк}$ , неизменной при неизменных массе и размерах бойка, требуемая скорость  $v_b$  может быть получена при тех же давлениях энергоносителя за счет большего пути разгона или при том же пути разгона бойка за счет увеличения давления энергоносителя. Следовательно, вполне возможно создание инструмента с длиной, не превышающей длину обычных многоударных молотков, за счет увеличения давления энергоносителя.

Изложенные выше принципы определяют особенности одноударной клепки, для осуществления которой скорость бойка должна измеряться десят-

ками метров в секунду, а давление энергоносителя (пороховых газов, сжатых до высокого давления газов, электромагнитного поля высокой напряженности и т.п.) достигать 30–160 атм. Повышение скорости движения бойка при одноударной клепке приводит к качественному изменению приемов клепки. Так, при энергии в 1000 Дж, подводимой к молотку, и массе его 2–5 кг, скорости бойка 50 м/с суммарное время разгона составит  $t \approx 10^{-3}$  с (при отношении масс  $m_k/m_b \approx 10-20$ ). Это время меньше времени, характерного для реакции человека, составляющего примерно 0,05 с. Это позволяет снизить требования к квалификации исполнителя, поскольку главная его задача при клепке сводится к установке молотка в правильное начальное положение.

## 2.2. Машины и оборудование для ручной одноударной клепки

В настоящее время известно достаточно много разнообразных конструкций одноударных машин для клепки /6, 8/, из которых доведены до практического применения: пневматические; пороховые; пневмогидравлические; магнитно-импульсные.

Пневматические молотки для клепки за один-два удара были созданы еще в 30-х годах, но не нашли применения из-за больших габаритов и веса, а также сильной отдачи и ряду других причин. Так, например, при эксплуатации одноударного клепального молотка 2 КМО выявились такие характерные для него недостатки, как утомительное и затруднительное для клепальщика управление молотком (необходимо было резко нажимать на пусковой курок), применение более тяжелой поддержки, нестабильность энергии ударов.

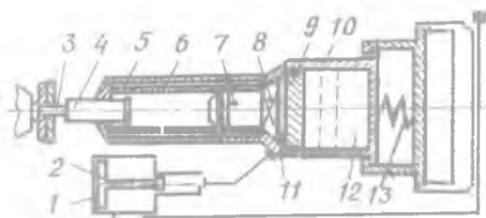
Однако продолжающийся поиск в этом направлении позволяет считать, что приемлемые для условий самолетостроительных заводов одноударные пневматические клепальные молотки будут созданы. Так, в США запатентован пневматический молоток с ресивером, позволяющий клепать за один удар /9/. В настоящее время и в нашей стране созданы сравнительно легкие молотки, которые используются главным образом для запрессовки болтов.

Пороховые молотки /8/ разработаны для клепки главным образом стальных заклепок диаметром до 24 мм в холодном состоянии. Достоинствами их являются полная автономность в силу отсутствия питающей установки, шлангов, кабелей и сравнительно небольшие массы и габариты.

Эти особенности наиболее ценны при работе в полевых условиях, например, в строительных работах или ремонтных. Однако шум, выхлоп-

ные газы, необходимость хранения и использования значительных количеств взрывчатых веществ затрудняют, а, точнее, исключают возможность их применения в цехах машиностроительных предприятий, а тем более в цехах сборки узлов и агрегатов летательных аппаратов. Кроме того, из-за колебания массы порохового заряда (+0,05 гр) пороховые молотки не могут в полной мере удовлетворять самолетостроительные предприятия по стабильности энергии ударов. На предприятиях авиационной промышленности наиболее распространены заклепки небольших диаметров (4–6 мм), для которых при одноударной клепке даже незначительные колебания энергии могут способствовать образованию соединений с контролируемыми параметрами, выходящими за пределы их поля допуска. Неудобным при эксплуатации является сложность регулирования энергии, а также образование нагара, что требует частой чистки и смазки устройства (примерно через 200 выстрелов). Поэтому большой интерес представляла разработка импульсных клепальных молотков не порохового действия, а работающих на сжатом до высокого давления газе (азота, воздуха и др.).

Пневмогидравлические молотки имеют габариты и массу, приближающиеся к параметрам многоударных пневмомолотков (см. табл. 2). В качестве энергоносителя в них используется сжатый азот, а приводом служит пневмогидравлический мультипликатор, широко применяемый при механизации клепально-сборочных работ. На рис. 9 представлена одна из схем молотка. Молоток состоит из корпу-



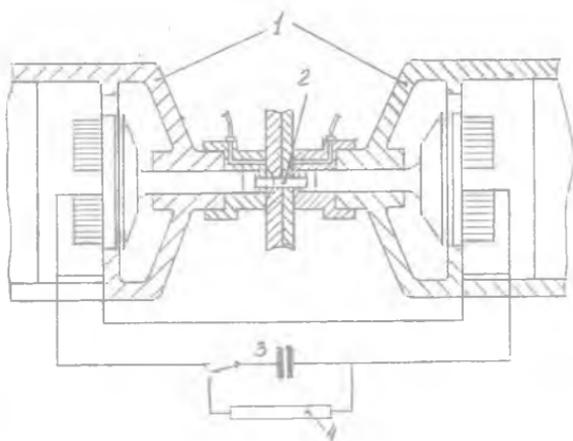
Р и с. 9. Принципиальная схема магнитно-гидравлического клепального молотка

са 10, ствола 6, бойка 7, обжимки 4, плавающего поршня 9, запирающего устройства 8, ресивера 12. В ресивер закачивается энергоноситель под высоким давлением ( $\sim 60 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>), а в камеру 5 закачивается от сети воздух низкого давления, служащий для возврата бойка в исходное положение. При подаче жидкости от привода I в полость II молотка плавающий поршень перемещается вправо и сжимает газ в ре-

сивере 12 до более высокого давления. При достижении заданного давления запирающее устройство 8 срабатывает и жидкость, находящаяся в полости II под высоким давлением, воздействует на боек 7 и разгоняет его до необходимой скорости. Плавающий поршень при этом становится в исходное положение. Боек наносит удар по обжимке 4, которая деформирует заклепку 3. При возврате штока 2 в исходное положение давление в полости II падает и боек 7 под действием газа, находящегося в камере 5, возвращается в исходное положение. Молоток готов для осуществления следующего рабочего хода. В молотках предусмотрена возможность плавной регулировки энергии удара в широких пределах. Для обеспечения допустимой величины усилия отдачи в молотке установлен амортизатор 13. Максимальное усилие прижатия молотка составляет 30-40 Н. Регулировка энергии удара производится вращением ствола. Применение пневмогидравлических молотков затрудняется сложностью их изготовления.

Магнитно-импульсные молотки (МИМ) используют в качестве энергоносителя импульсное электромагнитное поле высокой напряженности и, по существу, являются разновидностью машин с импульсным электродинамическим приводом.

В условиях серийного производства молотки были впервые использованы фирмой "Боинг" (США) для клепки панелей крыла самолетов Боинг-747 в тех местах, которые не могли быть проклепаны автоматом фирмы "Джемкор" модели G - 747 - 12 / 6/. Созданные специально для этой цели клепальные молотки обеспечили встречную клепку стержней-заклепок диаметром 9,5 мм из алюминиевого сплава. По качеству полученные заклепочные соединения не уступали соединениям, полученным на автомате. Инструменты массой более 34 кг каждый (диаметр 165 мм, а длина 393 мм) подвешены на балансирах и располагаются по обе стороны вертикально закрепленной в стапеле панели (рис. 10). Клепку производят два оператора. Соосное положение инструментов относительно друг друга и расклепываемого стержня отмечается сигналом (загоранием электролампы на одном из молотков). Получив сигнал, клепальщик нажимает на кнопку, и батарея конденсаторов разряжается через последовательно соединенные катушки молотков. Взаимодействие полей токов в катушках и индукционных токов в прилегающих к ним бойках обуславливает возникновение между ними электродинамических сил отталкивания, деформирующих заклепку. Источником энергии служит конденсаторная батарея емкостью до 6500 Дж при напряжении на ней до 6000 В. Энергоблок имеет габариты 0,9х1,2х1,5 м<sup>3</sup> и весит 1270 кг. Передача энергии к катушкам осуществляется по кабелям с малым сопротивлением.



Р и с. 10. Магнитно-импульсная клепка стержнями с помощью магнитно-импульсной клепальной системы, работающей по принципу синхронизированного двустороннего обжатия стержня: 1 - клепальные молотки; 2 - стержень; 3 - конденсаторы; 4 - источник постоянного тока

Как видно, отличительной особенностью магнитно-импульсной клепки является возможность синхронизации двух и более молотков с точностью  $10^{-6}$  -  $10^{-7}$  с, что позволяет найти принципиально новые пути решения проблем встречной клепки ручными молотками и др.

Очевидно, что магнитно-импульсная клепка обладает достоинствами, присущими магнитно-импульсной обработке в целом: высокая плотность энергии; точность регулирования запасаемой энергии; хорошая повторяемость процесса; простота автоматизации; универсальность оборудования.

Однако применить в отечественной промышленности молотки, подобные американским, не представляется возможным, в первую очередь, по соображениям охраны труда и техники безопасности из-за высокого напряжения на инструменте. Кроме того, высокое напряжение снижает ресурс катушки индуктора и его КПД. Поэтому в СССР интенсивные работы в области магнитно-импульсной клепки начались после решения проблемы по снижению напряжения на инструменте.

Была разработана конструкция импульсного трансформатора, который обеспечил снижение напряжения до 300-500 В при КПД до 50-70% /IG/ и позволил решить целый ряд задач:

а) снизить напряжение на индукторе и инструменте;

б) произвести гальваническую развязку цепи инструмента от высоковольтной силовой цепи магнитно-импульсной установки, что одновременно со снижением напряжения обеспечило электробезопасность инструмента;

в) повысить эффективность передачи энергии от установки к инструменту при значительном расстоянии между ними. Трансформатор при этом делается выносным, передача энергии от установки до трансформатора осуществляется на высоком напряжении, а далее - на низком.

Применение импульсного согласующего трансформатора позволяет также приспособить практически любую магнитно-импульсную установку, имеющую достаточную энерговооруженность и ресурс, для клепки. Однако внедрение магнитно-импульсной клепки в производство требует решения целого комплекса задач, связанных с отработкой как технологии клепки, так и конструкции элементов разрядной цепи, включая оборудование, инструмент, трансформатор и др., а также методики их расчета.

Особо следует отметить вопросы промсанитарии, гигиены и техники безопасности при работе с новым видом ручных машин.

В связи с этим целесообразно рассмотреть особенности процессов одноударной импульсной клепки и связанные с ними проблемы.

### 3. Особенности процессов одноударной клепки

данные исследований прессовой и многоударной клепки, наиболее полно рассмотренные в трудах В.П. Григорьева /2,3/, не могут быть в полной мере перенесены на импульсную клепку. Тем не менее такие основные показатели качества клепки, как натяг, создаваемый стержнем заклепки, плотность и равномерность прилегания закладной головки, стягивание сталец в процессе клепки и трещинообразование на замыкающих головках, могут характеризовать качество и при импульсной клепке.

Как уже отмечалось ранее, импульсная клепка может осуществляться только прямым методом, который обладает рядом преимуществ перед обратным методом. В то же время одним из дефектов при многоударной клепке прямым методом является зазор под закладной головкой заклепки. Это явление объясняется несинхронностью ударов молотка и поддержки. Однако и при одноударной клепке, когда несинхронность, естественно, отсутствует, поддержка прижата к закладной головке, возможно образование зазора. Происходит это потому, что поддержка под действием усилия клепки приходит в движение и совместно с заклепкой отходит от склепываемого сталеца. Это имеет место на первом этапе осадки стержня заклепки (до образования "перехвата" - первоначального касания стержнем стенок отверстия и заполнения зазора, рис. II).

Образование некоторого зазора под закладной головкой возможно и при неподвижной поддержке. Обусловлено это тем, что при осадке поверхность I стержня заклепки, контактирующая с обжимкой 3, имеет равную ей скорость  $v_{обж}$ , а поверхность II, контактирующая с неподвижной поддержкой, имеет скорость, равную нулю. Все промежуточные точки стержня имеют скорость в направлении осадки, отличную от нуля. Следовательно, точки стержня, лежащие в плоскости III, имеют некоторую скорость, вследствие чего под закладной головкой также возможно образование зазора, величину которого  $\sigma_1$  можно определить из выражения

$$\sigma_1 = \frac{H_1 l_1' [L_1(L_0 - l_1') + (L_1 - l_1')L_0]}{L_0 [(L_0 - l_1')(2L_1 - l_1') + (L_1 - l_1')l_1']}, \quad (2.1)$$

где  $L_0$  - полная длина заклепки, включая закладную головку;

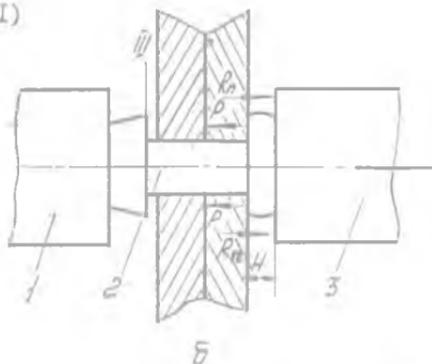
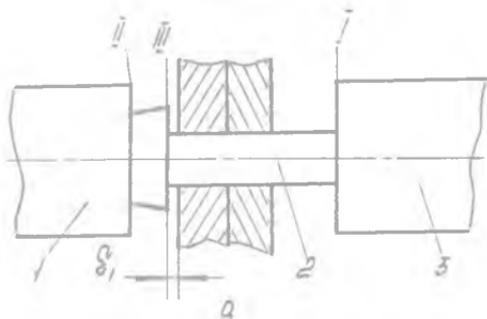
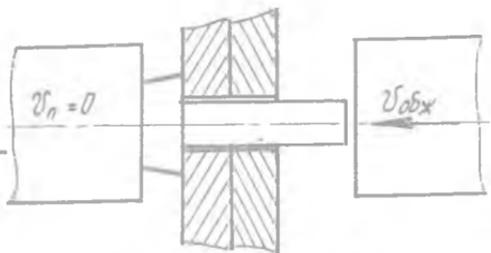
$L_1$  - путь полной осадки заклепки;

$l_1'$  - путь осадки заклепки до момента образования "перехвата";

$H_1$  - высота закладной головки заклепки.

Величина зазора  $\sigma_2$ , возникающего в случае перемещения поддержки, записывается выражением

$$\sigma_2 = \frac{(f_1 - f_0)(1 + K_1)l_0}{f_1 \left( \frac{m_n}{m_{обж}} - K_1 \right)}, \quad (2.2)$$



Р и с. II. Образование зазора  $\sigma$  под закладной головкой до появления "перехвата" (а) и во время формирования замыкающей головки (б): I - поддержка; 2 - заклепка, 3 - обжимка

где  $f_0$  и  $f_1$  - площади поперечного сечения стержня заклепки и отверстия, соответственно;

$l_0$  - длина стержня заклепки;

$m_n$  и  $m_{обж}$  - массы поддержки и обжимки;

$K_1$  - коэффициент восстановления при клепке.

Выражение для  $\sigma_2$  получено при допущении, что

$$l_1' = \frac{f_1 - f_0}{f_1} l_0,$$

а скорость поддержки  $v_n$  может быть записана выражением

$$v_n = \frac{v_{обж} m_{обж} (1 + K_1)}{m_{обж} + m_n},$$

где  $v_{обж}$  - скорость обжимки.

Из формул (2.1) - (2.2) видно, что величина зазора зависит от коэффициента восстановления  $K_1$  и таких технологических факторов, как первоначальный зазор между стенкой отверстия и заклепкой и соотношения масс поддержки и обжимки.

Рассмотрим, как происходит второй этап клепки. После образования "перехвата" замыкающая головка своими заплечиками воздействует на пакет с некоторым усилием  $P$ , а в пакете возникает усилие реакции  $R_n$  на это воздействие (рис. II, б).

В случае, когда  $P > R_n$ , пакет перемещается (прогибается) в направлении удара со скоростью большей, чем скорость перемещения закладной головки. В результате этого зазор под головкой уменьшается и в момент окончания деформирования становится равным нулю. Материал стержня, находящийся между закладной головкой и пакетом, возвращается в отверстие, вследствие чего повышается величина и равномерность натяга по толщине пакета. В рассмотренной ситуации, характеризующей податливый пакет, образование начального зазора играет положительную роль, аналогичную влиянию компенсатора в соответствующих заклепках.

Если  $P < R_n$ , то пакет не перемещается под действием усилия  $P$  и зазор под закладной головкой не устраняется. К концу второго этапа клепки возможно его увеличение за счет истечения материала заклепки в отверстие со стороны замыкающей головки. При этом перемещение поддержки в процессе осадки способствует увеличению зазора. Этот случай характеризует жесткий пакет.

Исследования по импульсной клепке пакетов различной жесткости позволили экспериментально установить, что податливым пакетом при импульсной клепке заклепок из сплава В65 может считаться пакет, клепка которого возможна многоударным молотком обратным методом.

Устранение зазора при клепке жестких пакетов возможно путем перемещения закладной головки заклепки в направлении пакета. Чтобы обеспечить это, предлагается для клепки жестких пакетов технология клепки их за два удара. Первый удар наносится со стороны стержня, а поддержку устанавливают на закладную головку. Второй удар с уменьшенной энергией наносится по закладной головке, а поддержку устанавливают на замыкающую головку, после чего зазор устраняется.

Как показали исследования, натяг в этом случае получается наиболее равномерным по толщине пакета, а закладная головка плотно прилегает к поверхности деталей. Хотя этот способ является более трудоемким, чем способ клепки за один удар, но он позволяет осуществить клепку жестких пакетов, что практически невозможно выполнить многоударными молотками. Поскольку зачастую соединение таких пакетов осуществляется с помощью классных болтов, трудоемкость постановки которых значительно превышает трудоемкость постановки заклепок, то замена болтов на заклепки при соединении жестких пакетов приводит к снижению стоимости, а также и веса соединения. Таким образом, при разработке технологии импульсной клепки необходимо учитывать жесткость клепаемых пакетов.

При импульсной клепке возникает также ряд специфических явлений, определяемых кратковременностью процессов и наличием больших пластических деформаций /8/. Взаимодействие обжимки с пластически деформируемым металлом стержня заклепки в течение 1-2 миллисекунд приводит к возникновению в металле инерционных сил, которые, в свою очередь, вызывают дополнительные динамические напряжения. Изменяется область, охваченная пластическими деформациями. Инерционные силы препятствуют распространению деформаций, что уменьшает или локализует зоны пластического деформирования. Это связано также с развитием тепловых эффектов, волновых явлений и некоторыми изменениями механических свойств деформированного металла.

Локализация зоны пластического деформирования объясняется прежде всего тем, что в процессе, например, высокоскоростного осаживания, скорости на различных участках пластической деформации металла различны. Максимальную кинетическую энергию накапливают объемы, расположенные в верхних периферийных точках, и значительно меньше энергии накапливается в нижних точках образца (рис. 12).



Р и с. 12. Образцы, деформированные с различными скоростями  $\dot{\epsilon} = 0,5$  /: слева направо - исходная заготовка; деформация со скоростью соответственно  $V = 0,001$  м/с;  $V = 25$  м/с;  $V = 50$  м/с;  $V = 100$  м/с

Данное обстоятельство имеет большое значение для оценки и разработки технологических процессов. Так, при пробивке отверстий оно проявляется в уменьшении пластической зоны, вследствие чего резко возрастают чистота поверхности стенок и точность пробитых отверстий, что позволяет поднять их качество до уровня качества отверстий, полученных механической обработкой.

При клепке пакетов из композиционных материалов, когда натяг в отверстиях нежелателен, локализация зоны деформации в зоне замыкающей головки открывает новые возможности как перед технологами, так и перед конструкторами. По существующей технологии клепки пакетов с композиционными материалами под замыкающую головку заклепки ставится ограничительная шайба, препятствующая образованию натяга в отверстиях, т.е. локализующая зону деформации в зоне замыкающей головки. Эффекты высокоскоростного деформирования могут позволить отказаться от постановки шайбы и тем самым существенно снизить вес соединения и его трудоемкость.

Однако высокий ресурс заклепочного соединения в однородных материалах, как отмечалось выше, требует создания высокого и равномерного натяга. В этом случае локализация зоны деформации играет негативную роль, так как снижает уровень натяга под замыкающей головкой. Кроме того, характерные для обычной клепки зоны интенсивной деформации в замыкающей головке в виде конических поверхностей, ограничивающих изнутри кольцевую зону относительно однородной деформации, при импульсной клепке локализируются настолько, что возникающие остаточные напряжения могут привести к отколу или растрескиванию замыкающей головки.

Во избежание этих явлений рекомендуется, с одной стороны, применять для клепки обжимки сферической формы с радиусом, равным диаметру заклепки, а с другой, - снимать фаску на кромке отверстия со сто-

роны замыкающей головки. Первое мероприятие обеспечивает создание высокого и равномерного натяга, но требует увеличения почти вдвое усилия расклепывания /3/, что не представляет сложности для молотков с такой энерговооруженностью, как импульсные. Кроме того, обжимка сферической формы упрощает клепальщику центрирование инструмента относительно заклепки.

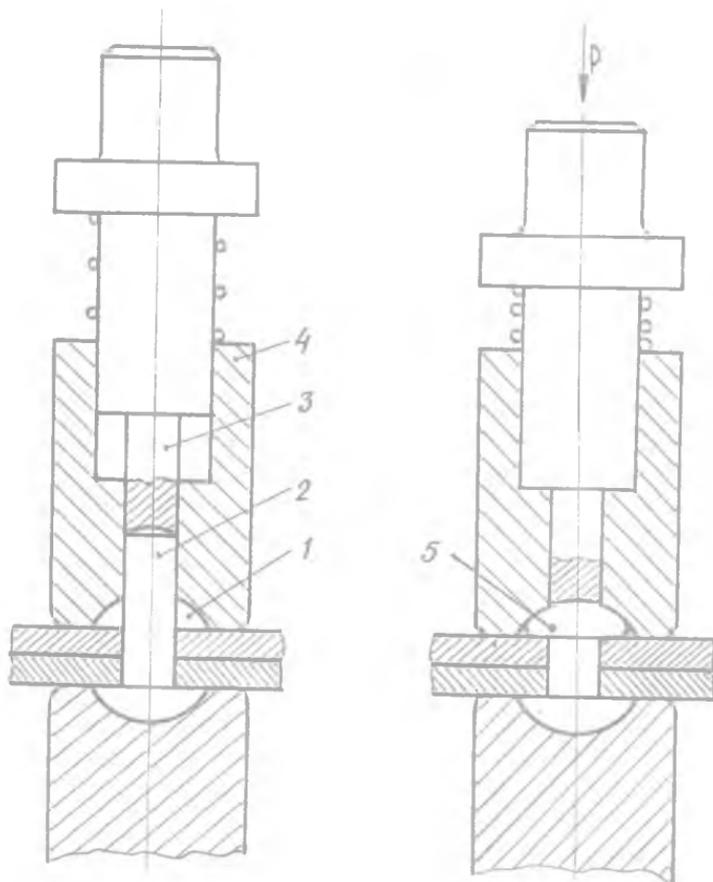
Фаска на кромке отверстия способствует расширению зоны пластического течения металла и, как следствие, снижению уровня остаточных напряжений.

Микроструктурные исследования соединений, выполненных с фаской, показали отсутствие локализованной зоны в месте перехода стержня заклепки в замыкающую головку. Экспериментально установлено, что для заклепок из сплава В65 существует ограничение скорости деформирования из-за локализации деформации и величина  $V_{\max}$  может быть принята 25-30 м/с. При клепке с образованием полукруглой замыкающей головки выравнивание деформаций происходит и в зоне верхнего конуса скольжения. Это также способствует повышению пластичности материала заклепок и снижению трещинообразования. Деформирование металла с высокими скоростями характеризуется значительными инерционными силами. Их возникновение объясняется изменением скоростей перемещения частиц металла, вызванным ударом обжимки. Ускорения, действующие на обрабатываемый металл, зависят от изменения скорости инструмента и положения точек в системе деформируемого тела.

В момент приложения деформирующей нагрузки силы инерции, имея противоположный знак, уменьшают действие внешней нагрузки. Энергетически это объясняется как расходом работы деформирования на преодоление работы инерционных сил, что и выражается в уменьшении очага деформации.

Как уже отмечалось выше, импульсная клепка осуществляется исключительно по прямой схеме, что ставит определенные ограничения по ее применению в местах с затрудненным доступом в зону клепки, главным образом, при клепке потайных заклепок, там, где обычно реализуется многоударная клепка по обратной схеме. Эта проблема могла бы быть решена применением способа клепки с образованием ПЗГ. Однако для этого необходимо разработать технологию клепки по схеме ПЗГ тонких обшивок, обеспечив к тому же минимальный объем подлежащего фрезерованию припуска замыкающей головки. Для получения стабильного качества клепки необходимо также полностью исключить основной вид брака при клепке по схеме ПЗГ - "завал" стержня.

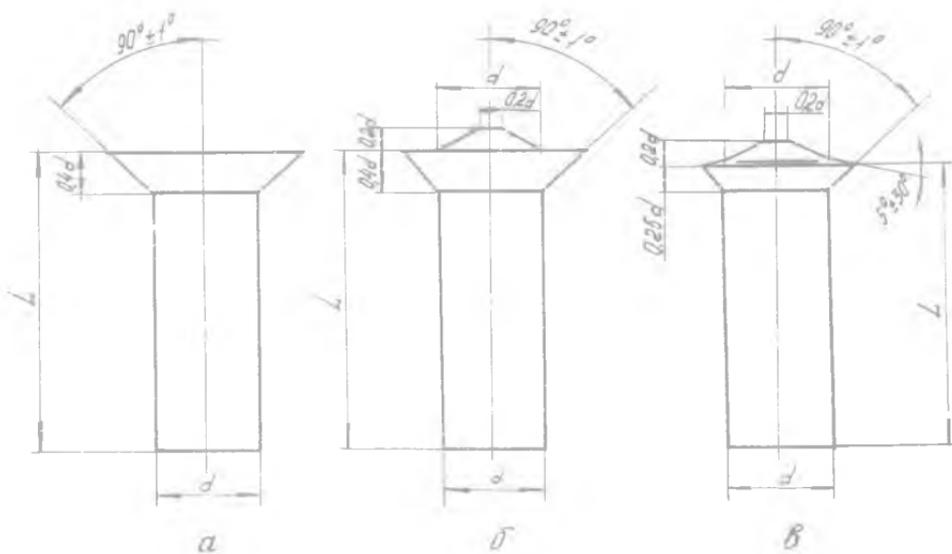
Рассмотрим вариант решения этой проблемы применительно к клепке податливого пакета. Для ликвидации "завала" стержня и обеспечения центровки обжимки по оси заклепки можно предложить комбинированную обжимку / II / . Она охватывает выступающую часть стержня заклепки по посадке движения, а осаживание ее производится путем выдавливания металла пуансоном в кольцевой зазор между поверхностью пакета и торцом контейнера вплоть до образования замыкающей головки, как это показано на рис. 13.



Р и с. 13. Комбинированная обжимка для клепки "выдавдванием":  
 1 - полость для образования замыкающей головки; 2 - стержень заклепки; 3 - пуансон; 4 - прижим-контейнер; 5 - замыкающая головка заклепки

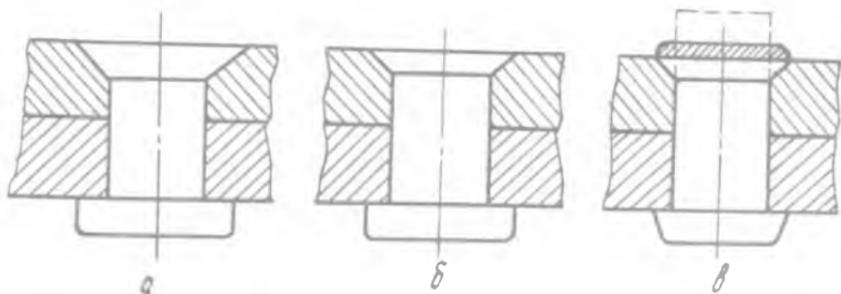
Как видно, данная конструкция инструмента гарантирует соосность его и заклепки за счет посадки последней в контейнер и упора торца контейнера в поверхность пакета.

Для того, чтобы клепать по рассмотренной схеме тонкие обшивки, можно предложить изменение геометрии потайной замыкающей головки по аналогии с заклепкой типа ЗУКМ /I2/, разработанной специально для клепки тонких листов. По сравнению с наиболее часто применяемыми заклепками типа ЗУ и ЗУК (рис. 14), она имеет уменьшенную головку как по диаметру, так и по высоте. Применительно к клепке с образованием ПЗГ это будет означать (рис.15) уменьшение объема замыкающей головки, что позволит: уменьшить величину припуска, так как для заполнения лунки меньшего размера требуется припуск меньшего диаметра и высоты; уменьшить длину заклепки; уменьшить усилие и энергию расклепывания и устранить коробление пакета.



Р и с. 14. Заклепки с потайной головкой: а-ЗУ, б-ЗУК, в-ЗУКМ

Некоторое снижение прочности соединения на отрыв в большинстве случаев не оказывает существенного влияния на его эксплуатационные характеристики, так как заклепочные соединения работают исключительно на срез и смятие, а предложенное решение улучшает эти показатели за счет увеличения длины цилиндрического участка отверстия. Таким обра-

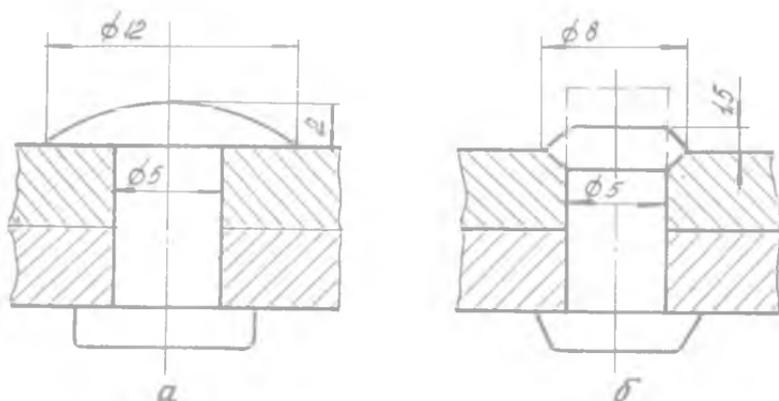


Р и с. 15. Типы соединений, образованные: традиционным методом заклепками типа ЗУК (а) и ЗУКМ (б), методом ПЗГ заклепкой ЗП в лунку, зенкованную по нормали ЗУКМ (в)

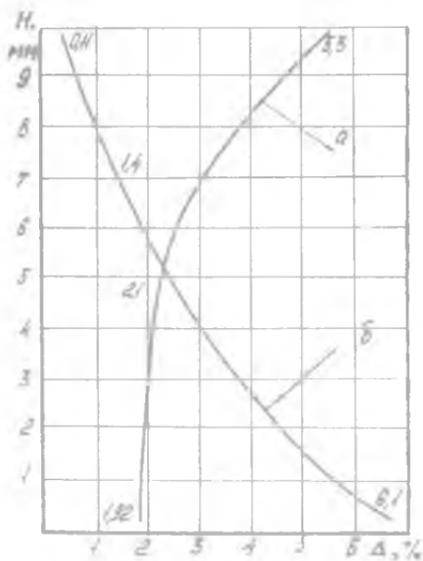
зом, предложенные решения полностью удовлетворяют выдвинутым требованиям. Однако можно их несколько улучшить с целью дальнейшего снижения длины заклепки и трудоемкости фрезерования припуска ПЗГ. Для этого увеличим ход пуансона таким образом, чтобы он выдавливал углубление в припуске ПЗГ. Торец пуансона должен при этом останавливаться не доходя до плоскости пакета для того, чтобы после фрезерования гарантировать превышение головки заклепки над поверхностью пакета в соответствии с требованиями производственной инструкции. Данное усовершенствование одновременно позволяет еще более снизить уровень энергии, необходимой для клепки за счет уменьшения объема деформированного металла заклепки.

В качестве примера рассмотрим соединение в конструкции балки, образованное листом толщиной 5 мм из сплава Д16АТ, элементом каркаса с толщиной стенки 5 мм из сплава АК-4 и заклепкой типа ЗВУ (рис. 16). для обеспечения возможности применения импульсной клепки может быть предложена новая конструкция соединения с полупотайной замыкающей головкой, образуемой из стержня заклепки типа ЗП. Качество соединения можно характеризовать прочностью на отрыв и натягом. Натяг в соединении, полученном по действующей технологии с помощью многоударной ручной клепки по обратной схеме, имеет большую неравномерность по толщине пакета и практически отсутствует под закладной головкой (рис. 17). В соединении же, полученном по предложенной технологии, натяг имеется по всему пакету и достигает 2% под закладной головкой.

Учитывая тот факт, что заклепка клепалась в толстом пакете, толщина которого равнялась двум диаметрам, можно считать, что предложенная технология позволяет избежать еще одного недостатка, свойствен-



Р и с. 16. Конструкции заклепочных соединений, выполненных: а - заклепкой ЗВУ по существующей технологии; б - заклепкой ЗП по предлагаемой технологии



Р и с. 17. Сравнительное распределение натяга  $\Delta$  по толщине пакета  $H$ : а - магнитно-импульсная клепка по схеме рис. 16,б; б - клепка пневмомолотками по схеме рис. 16,а

ного способу клепки с образованием ПЗГ. Таким недостатком является низкий натяг под закладной головкой, приводящий в эксплуатации к появлению усталостной трещины со стороны набора. Трещина в наборе гораздо более опасна, чем в обшивке, а главное, ее очень трудно обнаружить из-за сложности осмотра конструкции изнутри. Это явилось одной из главных причин, которые не позволили применить клепку с образованием ПЗГ в самолетостроении.

#### 2.4. Прочностные характеристики соединений

С целью проверки качества соединений при импульсной клепке ЦАГИ были проведены прочностные испытания образцов по стандартной программе сравнительных усталостных испытаний заклепочных соединений. Установлено, что выносливость соединений, выполненных импульсным молотком с образованием полукруглой замыкающей головки, превосходит в два раза выносливость соединений, выполненных с помощью пневмомолотка. Выносливость же соединений, выполненных импульсным молотком с образованием плоской замыкающей головки, ниже, чем выносливость соединений, выполненных с помощью пневмомолотка. Обусловлено это, вероятно, более низким натягом в отверстиях при импульсной клепке с образованием плоской замыкающей головки.

Как отмечалось выше, стеснение объема замыкающей головки способствует увеличению усилия расклепывания и натяга заклепки в пакете.

Таким образом, импульсная клепка, за счет получения высокого и равномерного натяга, равномерного и плотного прилегания закладной головки к поверхности деталей и отсутствия трещинообразования обеспечивает высокое качество соединения.

Образование зазора под закладной головкой на первом этапе импульсной клепки является положительным фактором, так как способствует увеличению равномерности натяга. Это приближает данный способ клепки по качеству к способу клепке стержнями, отличающемуся наиболее высокой равномерностью натяга.

Но результатам прочностных испытаний ЦАГИ рекомендует применять импульсные молотки взамен пневмомолотков при клепке самолетных конструкций с образованием полукруглой замыкающей головки.

### 3. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ И РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫХ КЛЕПАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

---

#### 3.1. Возможности применения одноударного привода для механизации и автоматизации клепально-сборочных работ

Как известно, одноударная клепка объединяет в себе признаки как прессовой, так и многоударной клепки. Образование соединения, как и при прессовой клепке, происходит за один рабочий ход инструмента, что является предпосылкой обеспечения высокой стабильности характеристик. С другой стороны, процесс осуществляется с большими скоростями, что обуславливает возникновение и влияние массовых сил, в первую очередь, инерционных, воздействующих на поддержку и склепываемый пакет.

Образование замыкающей головки за один удар практически исключает возможность клепки по обратной схеме, что ограничивает применение одноударной клепки по условию подхода инструмента к зоне клепки. Однако применение схемы клепки выдавливанием позволяет обеспечить стабильное качество процесса клепки с образованием потайной замыкающей головки.

Как было показано ранее (см. разд. 2.3), контейнер гарантирует соосность обжимки и заклепки и практически исключает возможность "завала" выступающей части стержня заклепки. Натяг под закладной головкой, находящейся в этом случае со стороны каркаса, создается за счет повышения давления клепки при выдавливании стержня заклепки из охватывающего его контейнера. Для большей гарантии могут быть применены заклепки с компенсатором.

Клепка ПЗГ в лунку уменьшенной глубины по типу лунки под закладную головку заклепки типа ЗУКМ открывает возможность клепки тонких листов толщиной меньше половины диаметра заклепки.

Характерные особенности магнитно-импульсного привода позволяют клепать встречным ударом двух бойков, что приближает процесс клепки к схеме прессовой клепки стержнем, дающей на сегодняшний день наилучшие результаты.

Таким образом, применение технологии одноударной клепки может обеспечить высокое качество соединений. При этом особое значение

приобретает возможность исключения влияния "человеческого" фактора на стабильность качества соединений. В конструкциях современных самолетов низкое качество отдельных соединений может резко снизить эксплуатационные характеристики целых узлов или агрегатов и, в конечном итоге, самолета в целом. В связи с этим обеспечение стабильного качества по всем заклепочным соединениям становится все более важной задачей. Следовательно, необходимо создавать такую технологию получения заклепочных соединений и соответствующее оборудование и инструмент, которые обеспечили бы минимальное влияние на качество соединения квалификации исполнителя, степени его утомления и других субъективных факторов.

Объем ручной многоударной клепки может быть существенно уменьшен путем применения одноударных клепальных машин. При этом достигается значительный социальный эффект за счет снижения или исключения таких вредных факторов, как шум и вибрация, источниками которых являются традиционные ручные машины - сверлильные машины и клепальные молотки.

Ранее уже рассматривались одноударные ручные молотки, работа которыми не требует высокой квалификации клепальщика и обеспечивает достаточно высокое качество соединений. Однако, как известно, наилучшие характеристики имеют заклепочные соединения, полученные в условиях, когда обеспечено предварительное сжатие пакета, что трудно обеспечить при ручной одноударной клепке. Использовать ее, следовательно, рационально в тех местах, где нельзя обеспечить статическое сжатие пакета. Поэтому представляется необходимым создание переносных или подвесных скоб нового типа, оборудованных пневмо- или гидроприжимом, для сжатия пакета и ударной головкой для клепки.

Преимуществами таких скоб по сравнению с обычными можно считать значительно меньшие вес и габариты при существенно большем вылете. Указанные преимущества объясняются тем, что конструкция скобы в этом случае должна воспринимать только статическое усилие сжатия пакета, в то время как усилие расклепывания воспринимается массами ударной головки и поддержки. Максимальная величина массы скоб может быть выбрана в соответствии с действующими рекомендациями для прямого способа клепки. Применение такого рода скоб позволит обеспечить клепку в местах, где нельзя применить гидроскобы. В работе /10/ описывается скоба с магнитно-импульсной клепальной головкой, оснащенная пневмоприжимом пакета. Скоба позволяет клепать стальные заклепки диаметром 5 мм в местах, недоступных для пневмомолотка и гидроскобы.

Скобы с вылетом в несколько метров (2-5м) могут применяться как стационарные клепальные прессы для одиночной клепки. Однако при не-

обходимости возможно их использование и как подвесных скоб для клепки, например, громоздких и крупногабаритных агрегатов. Масса таких скоб будет измеряться десятками килограммов в отличие от сотен и тысяч килограммов массы существующих клепальных прессов и поэтому им не потребуется тяжелых и сложных транспортирующих устройств.

Сравнительно малая масса одноударных клепальных устройств дает возможность легко манипулировать ими в процессе клепки неподвижно закрепленного агрегата. Таким образом, можно значительно механизировать процессы клепки в условиях стапельной сборки.

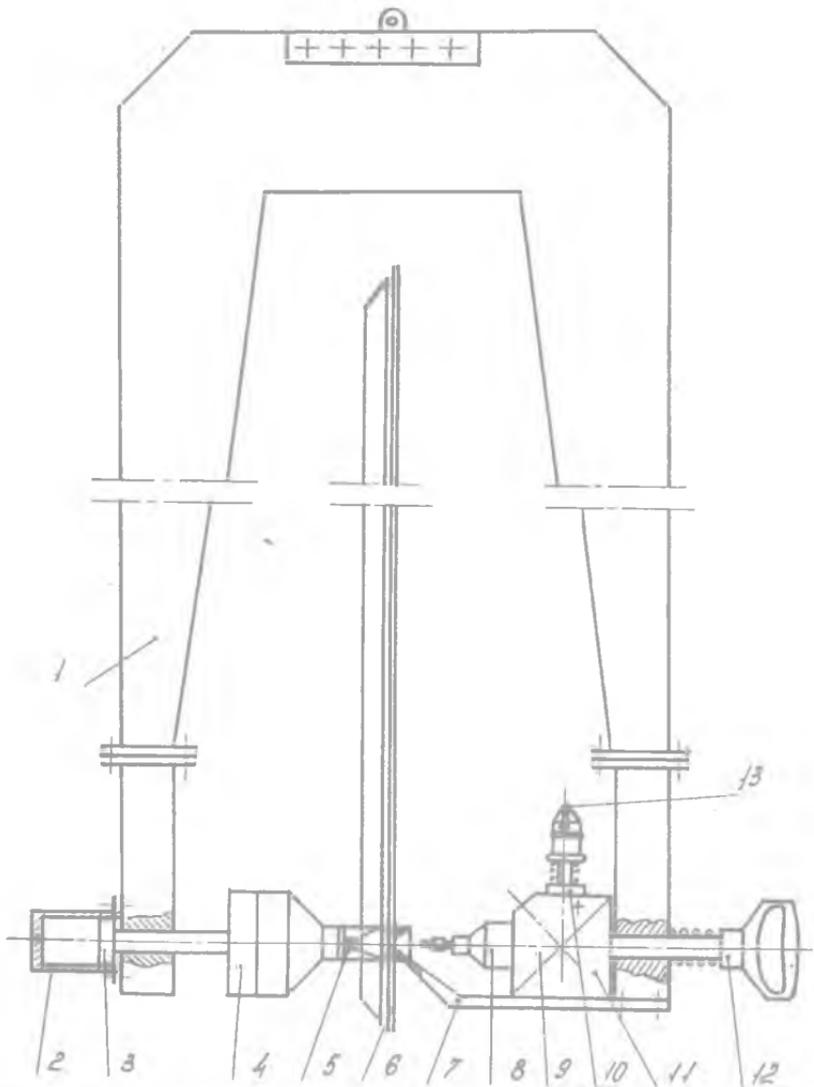
Весьма перспективным может оказаться применение одноударных клепальных устройств в комплексе с широко применяемыми в производстве летательных аппаратов сверлильными и сверлильно-зенковальными установками. Так, например, в работе /13/ предлагается оборудовать СЗУ устройством для вставки заклепок и головками, движущимися вслед за сверлильно-зенковальным агрегатом и связанными с ним автоматическим циклом. В результате отпадает необходимость в клепальном прессе, поскольку СЗУ становится, по существу, клепальным агрегатом.

Процесс автоматической клепки практически не зависит от квалификации исполнителя. Следствием этого являются высокая стабильность качества клепаных швов, лучшее качество поверхности шва, незначительные местные и общие деформации склепываемого изделия в связи с более равномерной и стабильной осадкой заклепок.

Кроме того, как известно, для значительного повышения производительности клепальных работ необходима комплексная автоматизация процесса одновременно по всем входящим в него операциям. При частичной автоматизации, когда из всех операций процесса производительность повышается только по одной-двум, общая производительность процесса клепки изменяется незначительно. Так, если производительность операции клепки, доля трудоемкости которой в общей трудоемкости процесса клепки составляет 0,3, в результате автоматизации увеличится в 10 раз, то производительность процесса в целом возрастает только в 1,37 раза /14/.

Одноударный привод позволяет значительно расширить возможности клепки в автоматическом цикле. Благодаря малым габаритам и массе оснащенные им устройства будут особенно эффективны в условиях стапельной сборки.

В качестве простейшего примера устройства, обеспечивающего непрерывность цикла клепки, можно рассмотреть экспериментальную конструкцию скобы с вылетом до 1,5 - 2 м для клепки панелей (рис. 18). Скоба из алюминиевого сплава рассчитывается на усилие сжатия пакета до

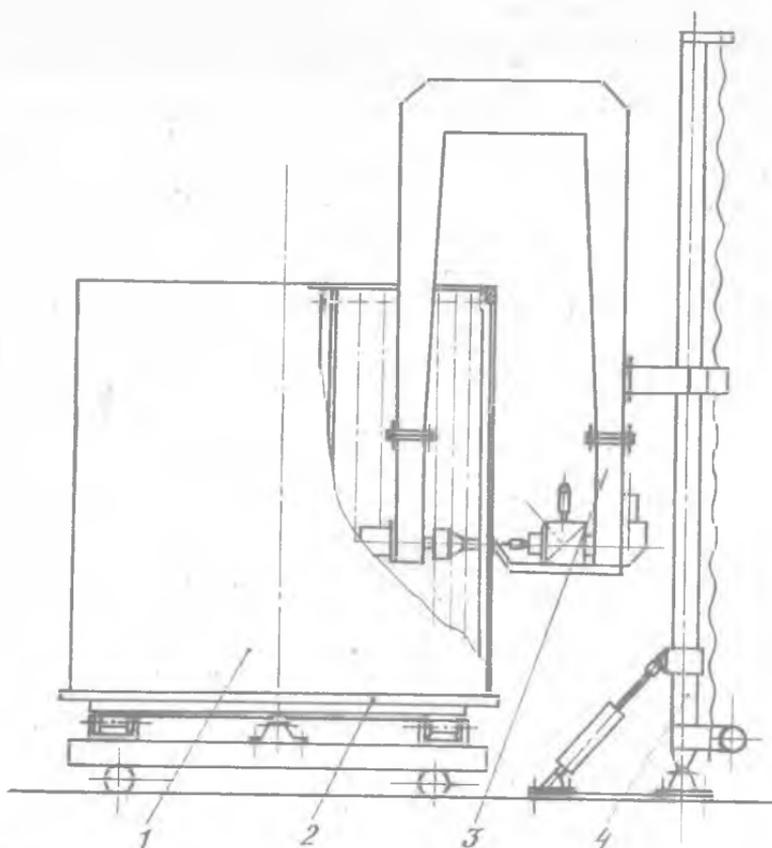


Р и с. 18. Подвесная скоба для клепки в цикле автомата /коммуникации условно не показаны/: 1-корпус; 2-пневмоцилиндр; 3-поршень; 4-магнитно-импульсная клепальная головка; 5-упор; 6-пакет; 7-неподвижный упор; 8 - сверлильная головка; 9-вращающаяся головка; 10-упор-поддержка с цапгой; 11-платформа; 12 - рукоятка; 13-заклепка, вставленная в цапгу

100 кг, которое обеспечивается с помощью пневматического цилиндра, на поршне которого крепится магнитно-импульсная клепальная головка. Передняя часть головки служит упором. Клепальной головке противопоставит неподвижный упор, над которым на подвижной платформе размещены сверлильная машина и упор-поддержка. Последние закреплены на вращающейся головке, обеспечивающей их установку соосно клепальной головке при сверлении отверстия и вставке в него заклепки. Подача подвижной платформы вместе с головкой в направлении сверления осуществляется вручную, так же, как и разворот головки для установки упора-поддержки. Упор снабжается цангой для удержания и центровки заклепки по примеру клепального автомата типа АК-2,2-0.5. Заклепка в цангу вставляется вручную. Образующаяся при сверлении стружка удаляется струей воздуха. Очевидно, что такая скоба не может обеспечить постановку более 2-3 заклепок в минуту. Однако она позволяет поднять в несколько раз производительность труда по сравнению со сверлением пневмодрелями и клепкой вручную пневмомолотком. Достигается это за счет ликвидации операций промежуточной разборки и сборки пакета, очистки от стружки и заусенцев. В ряде случаев могут быть сокращены или ликвидированы работы по герметизации заклепочных швов, поскольку клепка в автоматическом цикле обеспечивает высокое качество и герметичность соединений.

Применение механизмов привода рабочих головок на каждой операции позволит превратить скобу в полностью автоматизированное клепальное устройство нового типа. Для примера рассмотрим возможные конструкции подобного рода клепальных устройств. Для клепки обечайек, собирающихся в вертикальном (рис. 19) положении, может быть создан автомат в виде скобы, закрепленной на колонне. Скоба может перемещаться вдоль колонны по вертикали. С целью расширения технологических возможностей автомата колонна может быть установлена на подвижной шарнирной опоре, что позволит обрабатывать различного диаметра обечайки конической или оживальной формы. Сама обечайка должна быть установлена на вращающемся основании, с тем чтобы обеспечить доступ автомату к местам клепки по всему ее периметру. Управление работой такого комплекса должно осуществляться по программе подобно станкам с ЧПУ, как это делается на современных клепальных автоматах.

Однако наибольший интерес представляет возможность использования одноударного привода для создания автоматизированных сборочных приспособлений. В печати было опубликовано сообщение /15/ о том, что фирмой "Боинг" используется стапель сборки лонжерона, оснащенный устройствами для сверления отверстий, вставки заклепок и их раскле-



Р и с. 19. Клепальный автомат для клепки обечайки: 1—обечайка, 2 — вращающаяся опора; 3 — скоба; 4 — колонна

пывания. Клепка производится клепальными головками с магнитно-импульсным приводом. Управление всеми устройствами осуществляется с помощью микропроцессоров. Номенклатура используемых при сборке заклепок превышает 20 наименований. Рабочие-сборщики участвуют только в установке собираемых деталей и узлов в стапель и выполнении работ по внестапельной доработке лонжерона.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что применение сдвоенного привода для клепки открывает новое направление в механизации и автоматизации клепальных работ.

### 3.2. Расчет режимов работы магнитно-импульсного клепального молотка

Главной характеристикой технологического процесса магнитно-импульсной клепки является величина энергии  $W$  накопителя, т.е. конденсаторной батареи. Для ее определения необходимо знать или рассчитать КПД передачи энергии бойку и дальнейшее преобразование ее в работу деформации заклепки. При этом необходимо учитывать: потери энергии, отдаваемой поддержке, корпусу молотка, на соударение обжимки и бойка и на их "отскок".

В качестве основных параметров, подлежащих определению, можно выбрать коэффициент передачи энергии от накопителя бойку, работу деформаций заклепки и отдачу инструмента, а также массу поддержки.

Работа деформации с приемлемой для практики точностью может быть оценена по известной формуле, используемой при расчете процесса осадки цилиндрических заготовок:

$$A_{\text{деф}} = \sigma_{\text{ц}} V \epsilon n h / H,$$

где  $\sigma_{\text{ц}}$  - истинные напряжения;  $V$  - деформируемый объем.

Максимальное расхождение при этом составляет 8-10%, что было определено для заклепок из сплава В65 при скоростях удара до 50 м/с.

Работе деформации соответствует определенная энергия бойка с учетом оговоренных выше потерь. При использовании поддержек, рекомендуемых для тех же заклепок при обратной клепке, и легких обжимок  $m_{\text{обж}} \approx 0,1 - 0,2 m_{\sigma}$  величина потерь может быть учтена коэффициентом  $W_{\text{кст}} \approx 1,2 - 1,3 A_{\text{деф}}$ .

Для молотка, параметры которого известны, рассчитать скорость бойка при заданной энергии накопителя и параметрах разрядной цепи можно, используя следующие соотношения [16].

Уравнение движения проводника с индуцированным током в магнитном поле имеет вид:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{i_1(t) i_2(t)}{2} \frac{dL}{dx} - F,$$

где  $m$  - масса бойка;  $i_1$  - ток в индукторе;  $i_2$  - ток, индуцированный в проводнике;  $L$  - индуктивность системы индуктор-проводник;  $x$  - перемещение проводника (бойка);  $F$  - силы сопротивления.

При свободном разгоне бойка силами сопротивления можно пренебречь, т.е. считать  $F = 0$ . при малых зазорах между проводником и индуктором

можно принять  $i_1(t) \approx i_2(t) = i(t)$ . В магнитно-импульсных установках ток имеет колебательный затухающий характер, т.е.

$$i(t) = \sqrt{\frac{2W}{L(x)}} e^{-\frac{z}{2L}t} \sin \omega t,$$

где  $W$  - энергия, накопленная в батарее конденсаторов;  
 $z$  - активное сопротивление разрядной цепи;

$$\omega \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad \text{— частота разряда ( } C_0 \text{ — емкость батареи конденсаторов);}$$

$t$  - время.

В результате подстановок получаем уравнение в виде

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{2W}{L(x)} \frac{dL}{dx} e^{-\frac{z}{L}t} \sin^2 \omega t. \quad (3.1)$$

Начальную индуктивность системы индуктор-боек при  $x = x_0$  можно оценить по выражению

$$L_0 = \mu_0 n^2 \frac{2\pi R}{\ell} \Delta,$$

где  $\mu_0$  - магнитная постоянная;  $n$  - число витков индуктора;  
 $R$  - средний радиус индуктора;  $\ell$  - ширина токовой полосы индуктора;  $\Delta$  - эквивалентный зазор между индуктором и проводником.

Поскольку аналитическое определение зависимости  $L = L(x)$  при движении бойка весьма сложная задача, то чаще всего ее определяют из опыта.

Для большинства плоских индукторов полученные экспериментальные зависимости с достаточной точностью могут быть аппроксимированы функцией

$$L = a a_0 \text{ctg} \frac{x}{\beta},$$

где  $a$  и  $\beta$  - размерные коэффициенты, которые подбираются для каждого случая в соответствии с граничными условиями.

Таким образом, уравнение (3.1) можно представить в виде

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{W}{a_0 \text{ctg} \frac{x}{\beta} \beta (1 + \frac{x^2}{\beta^2})} e^{-\frac{z}{L}t} \sin^2 \frac{a_0 t}{\sqrt{L_0 a_0 \text{ctg} \frac{x}{\beta}}}. \quad (3.2)$$

Решая данное уравнение с помощью ЭВМ, можно определить все параметры движения бойка: ускорение, скорость, перемещения – и определить минимальный путь, на котором боек набирает максимальную скорость, соответствующую максимуму энергии  $W_K = \frac{m v_{\text{макс}}^2}{2}$ .

При  $W = \text{const}$  можно расчетным путем подобрать массу бойка, обеспечивающую наибольший электромеханический КПД молотка, характеризующий превращение энергии электромагнитного поля индуктора в кинетическую энергию бойка  $W_K$ .

На рис. 20 представлены результаты расчетов изменения электромагнитной силы  $F_M$ ,

перемещения  $\chi$ , кинетической энергии  $W_K$

во времени для бойков массой 0,05, 0,11 и 0,21 кг

при следующих параметрах разрядной цепи:  $L_0 =$

$= 125 \cdot 10^{-6}$  Гн,  $C_0 =$

$= 200 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $W = 400$  Дж,

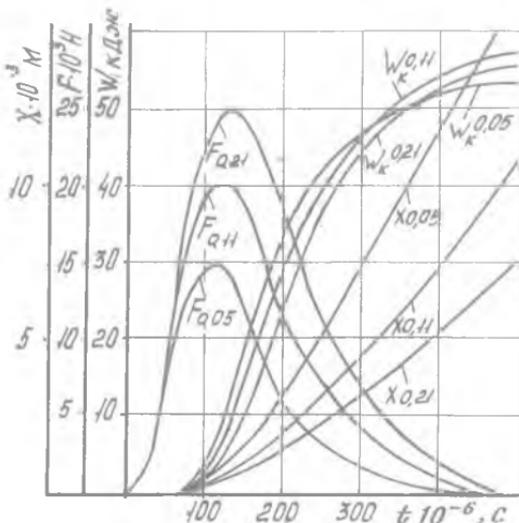
$z = 0,35$  Ом. Как видно, максимальную энергию  $W_K$  набирает боек массой 0,11 кг на пути  $8 \cdot 10^{-3}$  м.

Уравнение (3.2) позволяет определить также и параметры движения корпуса молотка, если решать

его не для массы бойка, а корпуса с присоединенной

массой руки. Установлено, что эффективная масса руки может быть принята равной 1,2 – 2,2 кг в зависимости от положения оси предплечья руки относительно оси молотка.

При совпадении осей предплечья и молотка эффективная масса руки максимальная, а при угле между осью руки и молотка, равном  $90^\circ$ , – минимальная. В связи с этим рекомендуется при клепке импульсными молотками располагать ось предплечья руки относительно оси молотка под углом, близким к  $90^\circ$ . Это возможно, так как необходимое усилие нажатия на импульсный молоток не превышает 30–40 Н.



Р и с.20. Электромагнитная сила  $F$ , перемещение  $\chi$  и кинетическая энергия  $W_K$  метаемого проводника массой 0,05, 0,11 и 0,21 кг

## Библиографический список

1. О с и н ц е в В.И., Б у н у е в а Г.А., К а ц н е л ь с о н Б.А. К анализу экономического ущерба от вибрационной болезни. - Гигиена и санитария, М.: "Медицина", 1976, № 10.
2. Г р и г о р ь е в В.П. Влияние технологии выполнения соединений в листовых деталях на их прочность и вносливость. - М.: Оборонгиз, 1963.
3. Г р и г о р ь е в В.П. Сборка клепаных агрегатов самолетов и вертолетов. - М.: Машиностроение, 1975.
4. Х е й в у д Р.Б. Проектирование с учетом усталости. - М.: Машиностроение, 1969.
5. В и г д о р ч и к С.А. Технологические основы проектирования и конструирования самолетов: Конспект лекций. Ч. Ш. М.: МАИ, 1976.
6. Б е л я н и н П.Н. Производство широкофюзеляжных самолетов. - М.: Машиностроение, 1979.
7. Пневматический клепальный молоток. Патент США В21 j 15/18, №4039034 от 02.08.77.
8. К о я о н е н к о В.Г. Высокоскоростное формоизменение и разрушение металлов. - Харьков: Высшая школа, 1980.
9. Одноударный заклепочный инструмент. Патент США В21 j 15/22, №3851713, 1974.
10. Л ы с е н к о Ю.Д. и др. Разработка и исследование технологических процессов и оборудования для магнитно-импульсной клепки. - В кн.: Получение деталей авиационной техники методами пластической деформации металлов. Куйбышев: КуАИ, 1981.
11. Обжимка для клепки. Патенты ст. Германии В21 j №590768, №517226, 1938.
12. М а н а и н к о в В.А., А к и м о в Ю.В., П л а у ц и н Д.В. Повышение ресурса клепаных соединений тонколистовых конструкций. - В кн.: Вопросы технологии сборки конструкций летательных аппаратов. Куйбышев: КуАИ, 1982.
13. А.с. №1103930 (СССР). Сверлильно-клепальный автомат. Синельников А.Я. и др. Оpubл. в Б.И., 1983.
14. Л ы с е н к о Д.Н., А к с ю т и н В.Д., Г л а д ы ш е в А.Л.Г. Сверлильно-клепальные автоматы. - В кн.: Вопросы технологии сборки конструкций летательных аппаратов. Куйбышев: КуАИ, 1982.
15. *New microprocessor system at Boeing automates wing spar assembly for 767 JAMJ, 10, 1980.*
16. П е т р о в Е.Н., К н я з е в В.П., Л ы с е н к о Ю.Д. Инженерный метод расчета процесса ускорения проводников в магнитном поле. - Вестник Харьковского политехнического института, 1976, №121.

|   |    |
|---|----|
| В в е д е н и е .....   | 3  |
| 1. ВЫСОКОРЕСУРСНЫЕ ЗАКЛЕПОЧНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ И МЕТОДЫ<br>ИХ ПОЛУЧЕНИЯ .....  | 5  |
| 1.1. Требования, предъявляемые к заклепочным<br>соединениям.....  | 5  |
| 1.2. Основные факторы, влияющие на долговечность<br>соединений.....   | 6  |
| 1.3. Причины повышения усталостной прочности сое-<br>динения с натягом.....   | 9  |
| 1.4. Способы обеспечения высокого радиального на-<br>тяга в заклепочных соединениях.....                              | 14 |
| 1.5. Машины и оборудование, применяемые для клепки.   | 22 |
| 2. ОДНОУДАРНАЯ КЛЕПКА.....  | 27 |
| 2.1. Особенности ручных машин для одноударной клеп-<br>ки.....  | 27 |
| 2.2. Машины и оборудование для ручной одноударной<br>клепки.....  | 30 |
| 2.3. Особенности процессов одноударной клепки.....  | 34 |
| 3. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ И РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ<br>МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫХ КЛЕПАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ.....                    | 45 |
| 3.1. Возможности применения одноударного привода для<br>механизации и автоматизации клепально-сборочных<br>работ..... | 45 |
| 3.2. Расчет режимов работы магнитно-импульсного кле-<br>пального молотка.....   | 51 |
| Библиографический список.....   | 54 |

Доп. план ДСП, 1985

Юрий Дмитриевич Лысенко

ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ МЕТОДОВ КЛЕПКИ  
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОРЕСУРСНЫХ  
ЗАКЛЕПОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Редактор Т.К.К р е т и н и н а  
Техн.редактор Н.М.К а л е н ю к  
Корректор Н.С. К у п р и я н о в а

Формат 60x84 I/I6. Бумага оберточная белая.  
Оперативная печать. Усл.п.л. 3,2. Уч.-изд.л. 3,0.  
Т. 200 экз. Заказ 27 Цена 10 к.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С.П.Королева,  
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Обл.тип.им.В.П.Мяги, г.Куйбышев; ул.Венцека, 60.