

На правах рукописи

Нгуен Чьонг Шинь

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СТВОЛОВ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ
ОРУДИЙ, ИСЧЕРПАВШИХ СВОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕСУРС ИЗ-ЗА
ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА КАНАЛА**

Специальность 05.02.08 – технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт – Петербург 2006

Работа выполнена в Балтийском государственном техническом университете
«ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф.Устинова

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Зайцев Алексей Сергеевич

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Панкратов Юрий Михайлович (СПбГПУ)

– кандидат технических наук, доцент
Григорьев Виталий Викторович (БГТУ «ВОЕНМЕХ»)

Ведущая организация – Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана

Защита состоится 27 июня 2006 года в 16⁰⁰ на заседании
диссертационного совета Д 212.229.26 при ГОУ ВПО «Санкт – Петербургский
государственный политехнический университет» по адресу: Санкт-Петербург,
Политехническая ул. 29, ГОУ СПбГПУ, 1-й учебный корпус, ауд. 41

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
при ГОУ ВПО «Санкт – Петербургский государственный политехнический
университет»

Автореферат разослан ____ мая 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., проф.

Тисенко В. Н

Опыт эксплуатации современной техники дает большое количество примеров эрозионного износа рабочих поверхностей деталей. Так, например, из-за эрозии выходят из строя рабочие лопатки газовых турбин, сопловые устройства турбореактивных двигателей, гильзы цилиндров двигателей внутреннего сгорания. Характерным техническим объектом, для которого эрозия и связанный с ней износ стали главенствующим фактором безотказности и долговечности всего технического комплекса, является ствол артиллерийского орудия.

Реализуя совместно со снарядом и пороховым зарядом внутрибаллистический процесс, канал ствола арторудия подвергается действию высокотемпературного, высокоскоростного потока пороховых газов, имеющих высокое давление и химическую активность. Именно поэтому артиллерийский ствол имеет технический ресурс значительно меньший, чем все другие узлы и детали арторудия.

Стремление повысить ресурс работы ствола, приблизить его долговечность к долговечности других узлов и деталей арторудия, вызвали множество исследований и технических предложений, относящихся как к стволу (эрозионностойкие покрытия, искусственное охлаждение и др.), так и к метательному заряду (флегматизаторы, неорганические защитные средства и др.) и снаряду (специальные материалы для ведущих устройств и др.). Однако, решить задачу этим путем в полной мере пока не удастся: стремление повысить мощность, дальнобойность и скорострельность артиллерийских орудий неизбежно вызывает трудности в обеспечении приемлемого технического ресурса стволов.

Актуальность темы.

Стволы артиллерийских орудий среднего и крупного калибров являются весьма дорогостоящими техническими объектами, так как сложны конструктивно, выполняются из специальных материалов, по специальным технологиям с особой степенью точности и малыми погрешностями формы. Исчерпывая свой технический ресурс из-за эрозионного износа канала, они в настоящее время практически подлежат утилизации, хотя и остаются вполне пригодными к эксплуатации по показателям прочностной долговечности, отсутствию деформаций, составу материала несущей части конструкции. Восстановление артстволов, таким образом, является актуальной задачей ресурсосбережения.

Практическая значимость работы. Определяется тем, что исследование направлено на решение актуальной задачи восстановления деталей, исчерпавших свой ресурс из-за эрозионного износа, на примере артиллерийских стволов орудий крупных и средних калибров. Восстановление баллистических характеристик и следовательно эффективности боевых ствольных комплексов даст технический и экономический эффект и откроет новые возможности усиления огневой мощи артиллерии Социалистической Республики Вьетнам.

Цель диссертационной работы.

Поиск научно-прикладных принципов, технических возможностей и экономически эффективных технологий восстановления (как результата некоторых ремонтных работ) такого класса деталей как артиллерийские стволы; получение оснований для масштабной организации соответствующих ремонтных работ, экономический эффект от которых будет состоять в избежании излишних затрат на изготовление новых дорогостоящих деталей.

Научная новизна диссертационной работы.

На основании анализа теплонпряжённого состояния стволов в процессе огневой эксплуатации и диагностики их технического состояния после исчерпания ресурса по износу канала в диссертации определены критерии возможности восстановления их рабочих характеристик и предложены конструктивно-технологические схемы восстановления.

С учётом новой постановки задачи и с учетом последних достижений теории надёжности и ресурсосбережения в работе комплексно пересмотрено научно-практическое положение о практической неремонтнепригодности данного класса деталей.

Впервые получен ряд оригинальных технических решений по ремонту стволов. Эти (ранее неизвестные или применявшиеся для других целей или в других областях техники) решения научно обоснованы теоретически и с позиции технологической осуществимости.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались:

- на общероссийской научно-технической конференции «Вторые Уткинские чтения», БГТУ, СПб., 2005.

Объем и структуры работы. Диссертационная работа изложена на 162 страницах машинного текста и состоит из введения, четырех глав, списка литературы (62 наименования).

Во введении рассмотрены актуальность темы диссертационной работы, определён круг решаемых задач, дана краткая характеристика работы.

В первой главе, проанализированы и обобщены изложенные в литературе основные положения и опытно-экспериментальные данные по износу и живучести артстволов, что позволило установить ряд обстоятельств, существенных для решения задачи восстановления стволов, а именно:

- диаметральный износ канала ствола чрезвычайно неравномерен по длине: составляя для стволов, исчерпавших живучесть, в начале канала ствола несколько мм в остальной части ствола он практически отсутствует (рис. 1);

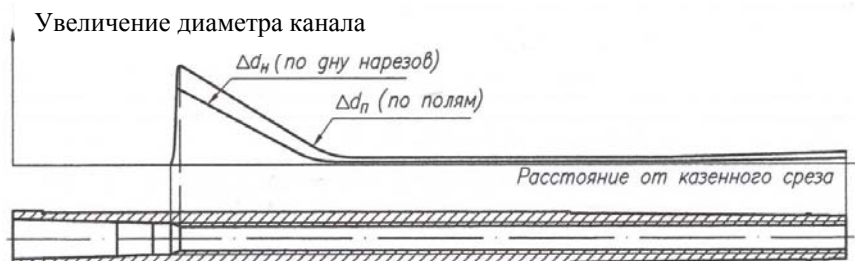
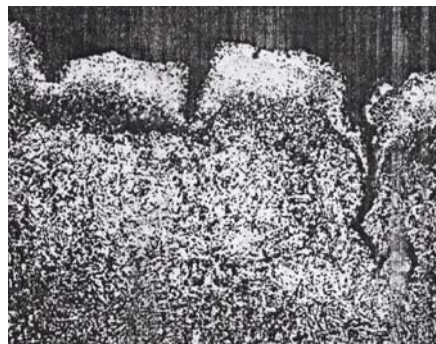


Рис. 1. Характерная диаграмма износа канала нарезного ствола по длине

- восстановление канала ствола необходимо лишь на длине, не превышающей в общем случае 10 калибров от начала калиберной части канала ствола; остальная часть канала восстановления не требует;

- структурно поврежденный, имеющий микротрещины и измененный химический состав слой металла ствола, прошедшего огневую эксплуатацию до исчерпания живучести, составляет не более $200 \div 250$ мкм; остальная часть материала стенки сохраняет рабочие характеристики прочности, упругости и теплофизические характеристики (рис. 2).

Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя металла канала ствола (поперечный шлиф; увеличение в 600 раз).



Далее в первой главе обоснованы и сформулированы общие требования к восстановленным стволам:

1. Обеспечение баллистических характеристик артсистемы на уровне не ниже, чем у артсистемы с новым стволом.

2. Надлежащая (гарантированная) прочность восстановленной конструкции.

3. Наименьший износ канала ствола и приемлемый технический ресурс ствола.

4. Технологичность и экономичность восстановления.

Проведенный по литературным источникам анализ возможных способов восстановления деталей, исчерпавших свой ресурс из-за эрозионного износа, позволил из множества способов выделить рациональные применительно к артстволом области технических решений, которые сводится к двум видам технологии: нанесение покрытий и дополнительные ремонтные детали.

Проведенное сравнение необходимой для стволов толщины восстановительных покрытий (не менее $5 \div 10$ мм) и толщин, которые могут быть достигнуты наплавкой, приваркой, напылением, плакированием, химическим осаждением из растворов, электролизом и другими способами, привело к выводу, что восстановление ствола покрытием возможно лишь при нижней границе требуемой толщины восстановления. Даже в этом случае требуются дополнительные исследования по устранению сопутствующих этим способам недостатков, в первую очередь того что, основной материал восстанавливаемых деталей претерпевает существенные структурные и химические изменения.

Практически более приемлемые решения могут быть реализованы для восстановления артстволов с помощью так называемых **дополнительных ремонтных деталей (ДРД)**.

В главе 1 сформулированы и обоснованы с позиций технологической осуществимости конструктивные предложения по восстановлению артстволов среднего и крупного калибров с помощью лейнирующих и скрепленных втулок (рис. 3 и 4).

Для того чтобы восстановить ствол при помощи обеих разновидностей втулки в диссертации предлагается следующая укрупненная технология:

1) удаляется путём расточки некоторый поврежденный слой металла до определенной величины r_2 (в месте наибольшего износа протяжённостью $5 \div 10d$);

2) изготавливается из оружейной стали втулка, которая по конфигурации и размерам соответствует удаленному при износе и расточке слою металла;

3) втулка вставляется в место расточки ствола с совмещением нарезов на втулке и стволе с натягом или с зазором, тогда нужно закрепить втулку в стволе.

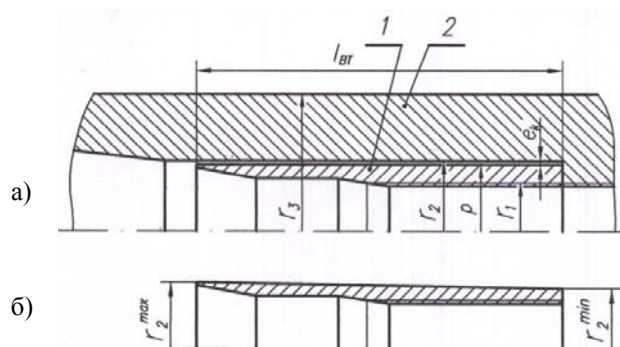


Рис. 3. Схема восстановления ствола с помощью лейнирующей втулки. 1- Лейнирующая втулка; 2 - ствол - моноблок (оболочка на участке восстановления); а) цилиндрическая втулка; б) коническая втулка; ϵ_k - конструктивный зазор.

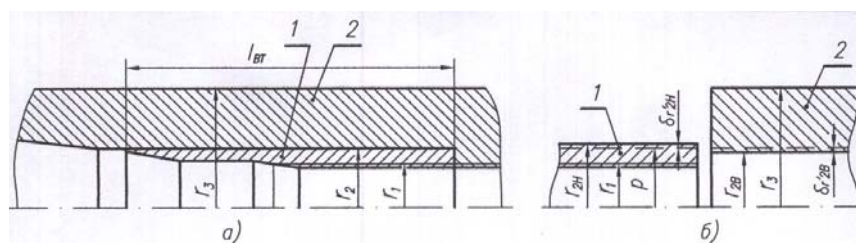


Рис. 4. а) Схема восстановления ствола с помощью скрепленной втулки: 1 - Втулка; 2 - Ствол – моноблок (кожух на участке скрепления). б) Схема скрепления и размеры слоев ствола: 1 - втулка; 2 - оболочка.

Далее в первой главе произведен системный анализ, сформулированы и обоснованы условия работоспособности стволов, восстановленных с помощью лейнирующих и скрепленных втулок. В частности, условие работоспособности по критерию прочности предусматривает коэффициенты запаса прочности не ниже, чем в исходной конструкции, а по критерию живучести – не менее 80% от предельного настрела (технического ресурса) исходного ствола.

Оставляя за рамками настоящего автореферата общую систему условий работоспособности восстановленного ствола (всего она содержит около 40 параметров, разбитых на пять функциональных групп), приведем лишь те, которые являются критичными для принятого способа восстановления стволов с помощью ДРД - втулок.

Параметры, характеризующие общую поперечную, продольную и местную прочность ствола и его частей: $\sigma \leq [\sigma]$ и $P_1 \geq [P]$,

где $\sigma = \{\sigma_{\text{ЭКВ}}, \sigma_{kp}, \sigma_z^a\}$ - матрица-строка расчетных показателей НДС;

$P_1 = \{P_1^y, P_1^{ckp}, P_2^{\sigma\delta}, P_y^a\}$ - матрица-строка расчетных показателей поперечной прочности (упругих и возможных сопротивлений);

$[\sigma]$ - матрица-строка допустимых значений напряжений;

$[P]$ - матрица-строка требуемых (желаемых) сопротивлений; соответствующие им запасы (нормы) прочности принимаются по исходному (новому) стволу;

$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ - эквивалентные напряжения в нарезке ствола;

σ_{kp} - максимальные напряжения в элементах крепления втулки;

σ_z^a - максимальные осевые напряжения в лейнирующей втулке;

P_1^y - предел упругого сопротивления моноблока;

P_1^{ckp} - предел возможного сопротивления скрепленного ствола;

$P_2^{\sigma\delta}$ - упругое сопротивление оболочки лейнированного ствола;

P_y^a - упругое сопротивление лейнирующей втулки.

Параметры, характеризующие изменение формы, размеров и состояния поверхности канала ствола: $\delta \leq [\delta]$, здесь $\delta = \{\Delta d_{II}, \Delta \lambda_0, \delta_{cf}\}$,

где Δd_{II} - суммарный диаметральный износ при некотором настреле по полям;

$\Delta \lambda_0$ - удлинение зарядной камеры (смещения контрольного сечения к дульному срезу из-за износа канала);

δ_{cf} - глубина зоны структурных превращений в металле втулки;

Параметры, характеризующие тепловой аспект условий работоспособности: $T \leq [T]$,

где T - матрица-строка характерных тепловых показателей,

$$T = \{T_{yn}, T_1^{\max}, \delta r_2^{BT}, T(r_1, r_2)\}$$

T_{yn} – температура поверхности канала в начале нарезов перед очередным выстрелом (общий уровень нагрева);

T_1^{\max} – максимальная температура поверхности канала;

δr_2^{BT} – тепловое расширение втулки по наружному диаметру;

$T(r_1, r_2)$ – среднеинтегральная температура по толщине стенки.

Во второй главе рассматривается задача обеспечения прочности восстановленных стволов как задача определения конструктивно-технологических параметров восстановления, которые обеспечили бы показатели прочности восстановленных (с помощью лейнирующих и скрепляющих втулок) стволов не менее, чем у исходной конструкции.

Рассмотрение основных положений теории артстволов применительно к двум схемам восстановления (лейнирующая и скрепляющая ДРД - втулки) дало возможность сформулировать теоретические основания для расчета прочности восстанавливаемых артстволов, включающие:

- адаптированный к составным по толщине конструкциям метод определения компонентов НДС;

- теорию наибольших относительных деформаций как рабочую гипотезу поперечной прочности восстанавливаемых с помощью ДРД – втулок артстволов;

- методику формирования требуемых коэффициентов запаса прочности по условиям работоспособности восстанавливаемых конструкций.

Рассмотрение условий работоспособности по прочности для стволов, восстановленных с помощью лейнирующих втулок (рис. 3), конкретизируется в виде следующих неравенств:

$$n_i^a \geq n_i^{m/\delta}, P_{yi}^a \geq P_{li}^0 n_i^{m/\delta}, P_{2i}^{o\delta} \geq P_{\rho i}' n_i^{m/\delta}, n_{л.ВТ}^z \geq \min\{n_i^{m/\delta}\}, n_{kp} \geq \min\{n_i^{m/\delta}\},$$

где $i=1, 2, 3, \dots, m$ (m – число расчётных сечений по длине втулки).

Здесь $n_i^{m/\delta} = \frac{P_{li}^{m/\delta}}{P_{KH}^i}$ – коэффициент запаса прочности исходного ствола-моноблока;

$$n_i^a = \frac{P_{li}^a}{P_{KH}} \text{ - коэффициент запаса прочности восстановленного ствола;}$$

$$P_{li}^n = \frac{3}{2} \left(\sigma_e^{BT} - E\gamma_\rho \frac{a_{31} - a_{21}}{a_{31} - 1} \right) \frac{a_{31} - 1}{2a_{31} + 1} - \text{предел возможного сопротивления}$$

ствола со втулкой;

$P_{li}^{M/\bar{\sigma}}$ - предел упругого сопротивления исходного моноблока;

P_{KH}^i - давление на стенки ствола;

P_{yi}^n - предел упругого сопротивления втулки;

P_{li}^0 - давление прилегания (выбирающее зазор e_k);

$P_{2i}^{o\bar{\sigma}}$ - предел упругого сопротивления оболочки (часть моноблока после расточки);

$P_{\rho i}'$ - давление, передаваемое втулкой на оболочку;

$n_{л.БТ}^z$ - коэффициент запаса продольной прочности втулки;

$n_{кр}$ - коэффициент запаса прочности элементов крепления втулки.

Входящие в условия работоспособности величины получены в следующем виде (индекс i для простоты записи опущен)

$$n^{M/\bar{\sigma}} = \frac{P_{li}^{M/\bar{\sigma}}}{P_{KH}} = \frac{3}{2} \frac{\sigma_e^{M/\bar{\sigma}}}{P_{KH}} \frac{a_{31} - 1}{2a_{31} + 1} = \frac{3}{2} \frac{\overline{\sigma_e^{M/\bar{\sigma}}}}{\sigma_e^{M/\bar{\sigma}}} \frac{a_{31} - 1}{2a_{31} + 1} = \kappa_{M/\bar{\sigma}} \overline{\sigma_e^{M/\bar{\sigma}}},$$

$$\text{где } \overline{\sigma_e^{M/\bar{\sigma}}} = \frac{\sigma_e^{M/\bar{\sigma}}}{P_{KH}}; \kappa_{M/\bar{\sigma}} = \frac{3}{2} \frac{a_{31} - 1}{2a_{31} + 1}; a_{31} = \frac{r_3^2}{r_1^2}.$$

$$n^n = \frac{P_1^n}{P_{KH}} = \frac{3}{2} \left(\frac{\sigma_e^{л.БТ}}{P_{KH}} - \frac{E\gamma_\rho^{\max}}{P_{KH}} \frac{a_{31} - a_{21}}{a_{31} - 1} \right) \frac{a_{31} - 1}{2a_{31} + 1} = \left(\overline{\sigma_e^{л.БТ}} - \frac{E\gamma_\rho^{\max}}{P_{KH}} \frac{a_{31} - a_{21}}{a_{31} - 1} \right) \kappa_{M/\bar{\sigma}},$$

$$\text{где } a_{21} = \frac{r_2^2}{r_1^2}, \overline{\sigma_e^{л.БТ}} = \frac{\sigma_e^{л.БТ}}{P_{KH}}, \gamma_\rho^{\max} - \text{относительный зазор,}$$

Для выполнения условия прочности $n_{факт}^n \geq n_{факт}^{M/\bar{\sigma}}$ необходимо, чтобы

$$\overline{\sigma_e^{л.БТ}} - \frac{E\gamma_\rho^{\max}}{P_{KH}} \frac{a_{31} - a_{21}}{a_{31} - 1} \geq \overline{\sigma_e^{M/\bar{\sigma}}}, \quad \text{что означает необходимость (при}$$

фиксированном значении γ_ρ^{\max}) увеличения категории прочности металла

втулки по сравнению с исходным на величину

$$\Delta \sigma_e^{л.БТ} = \sigma_e^{л.БТ} - \sigma_e^{M/\bar{\sigma}} \geq E\gamma_\rho^{\max} \frac{a_{31} - a_{21}}{a_{31} - 1},$$

или при принятом $\Delta \sigma_e^{л.БТ}$ обеспечение конструктивно γ_ρ^{\max} в пределах:

$$\gamma_{\rho}^{\max} \leq \frac{\sigma_e^{\lambda.BT} - \sigma_e^{M/6}}{E} \frac{a_{31} - 1}{a_{31} - a_{21}}.$$

С помощью полученных зависимостей проанализирована конструктивно-технологическая возможность осуществления зазоров, гарантирующих поперечную прочность восстановленного ствола в рассматриваемом варианте восстановления. В диссертации это сделано применительно к трем выбранным базовым конструкциям артстволов разных калибров (85-мм дивизионная пушка образца 1944 г, 100-мм полевая пушка образца 1944 г и 152-мм пушка-гаубица образца 1937 г) при допущении, что величина $\Delta\sigma_e^{BT}$ составляет не более 15 единиц категории прочности. Исходные характеристики стволов и ДРД - втулок представлены в таблице 1. Диапазон возможных толстостенностей втулок (r_2) принят конструктивно: минимальная - по наибольшему радиусу переходного конуса камеры, максимальная - по выходному сечению камеры.

Полученные значения γ_{ρ}^{\max} для всех стволов лежат в диапазоне $0,00073 \div 0,00088$, что соответствует в абсолютном выражении $0,04 \div 0,07$ мм. Современная технология изготовления стволов позволяет обеспечить такие величины зазоров в лейнированных конструкциях.

Таблица 1

Калибр, мм	$\sigma_e^{M/6}$, кг/мм ²	$\sigma_e^{\lambda.BT}$, кг/мм ²	r_1 , мм	r_3 , мм	r_2 , мм
85	75	90	43,4	100,0	47 ÷ 55
100	75	90	51,5	125,4	54 ÷ 70
152	70	85	76,2	134,5	80 ÷ 85

В диссертации показано, что возникающие при реализации данной схемы дополнительные задачи продольной прочности и крепления ДРД – втулки могут быть обеспечены конструктивно и технологически.

Во второй главе также рассмотрены условия работоспособности по прочности для стволов, восстанавливаемых с помощью скрепляющих втулок.

В диссертационной работе рассмотрен, как основной технологический прием, сборка ствола и втулки с натяжением за счет охлаждения последней в жидком азоте.

С учетом необходимого коэффициента запаса “на монтаж” $K_m = 1,25$ (неизбежно некоторое повышение температуры втулки во время сборки),

проведена оценка реального достижимого диапазона относительных натяжений $\gamma = \frac{r_{2H} - r_{2B}}{r_2}$ для трех базовых конструкций стволов. Он составил $\gamma^{\max} = 0,0016$, $\gamma^{\min} = 0,0010$.

Условия работоспособности по параметрам, характеризующим поперечную прочность ствола восстановленного с помощью скрепляющей втулки определяются неравенствами:

$$n_i^{BT} \geq n_i^{m/6}; \quad n_i^{КОЖ} \geq n_i^{m/6} \chi_2,$$

где $i = 1, 2, 3 \dots m$ (m – число расчётных сечений по длине втулки).

Здесь дополнительно обозначено:

$$n_i^{BT} \geq \frac{P_{li}}{P_{KH}} \quad - \text{коэффициент запаса прочности по втулке}$$

восстановленного ствола;

$$n_i^{КОЖ} = \frac{P_{li}^{(2)}}{P_{KH}^i} \quad - \text{коэффициент запаса прочности ствола по кожуху};$$

P_{li} - предел возможного сопротивления скрепленного ствола;

$P_{li}^{(2)}$ - действительное прочное сопротивление ствола по кожуху;

χ_2 - коэффициент резерва прочности по радиусу r_2 .

$$\chi_2 = \frac{2a_{31} + a_{21}}{a_{21}(2a_{31} + 1)},$$

Показано, что для выполнения условия прочности $n_{факт}^{BT} \geq n_{факт}^{m/6}$

достаточно, чтобы

$$\frac{\sigma_e^{BT}}{\sigma_e^{m/6}} + \frac{E\gamma_2^{\min}}{P_{KH}} \frac{a_{31} - a_{21}}{a_{31} - 1} \geq \frac{\sigma_e^{m/6}}{\sigma_e^{m/6}}, \text{ т.е. } \Delta\sigma_e^{BT} = \sigma_e^{BT} - \sigma_e^{m/6} \geq -E\gamma_2^{\min} \frac{a_{31} - a_{21}}{a_{31} - 1}.$$

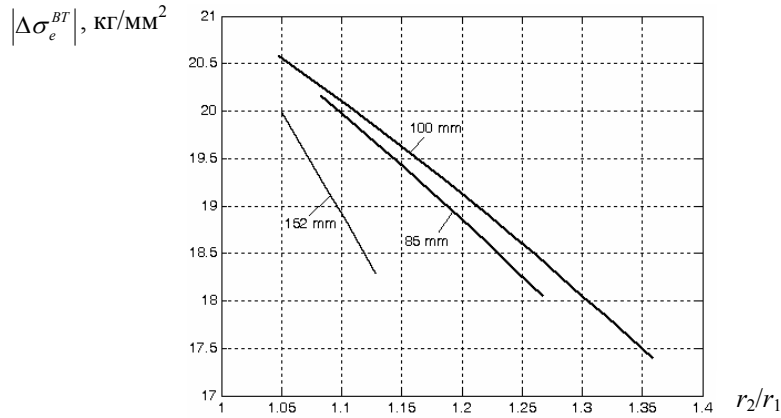
Поскольку величина $\Delta\sigma_e^{BT}$ отрицательная, это означает возможность (при фиксированном значении γ_2^{\min}) снижение категории прочности металла скрепленной втулки по сравнению с исходным стволом – моноблоком на величину $E\gamma_2^{\min} \frac{a_{31} - a_{21}}{a_{31} - 1}$.

Рис. 5 иллюстрирует возможность снижения категории прочности металла втулки по сравнению с исходной, гарантирующую поперечную прочность восстановленного ствола по втулке. Расчеты сделаны применительно к трем базовым конструкциям артстволов при допущении, что

величина γ_2^{\min} составляет не более 0,001. Исходные характеристики стволов и ДРД - втулок представлены в таблице 2.

Таблица 2

Калибр, мм	$\sigma_e^{M/6}$, кг/мм ²	γ_2^{\min}	r_1 , мм	r_3 , мм	r_2 , мм
85	75	0,001	43,4	100,0	47 ÷ 55
100	75	0,001	51,5	125,4	54 ÷ 70
152	70	0,001	76,2	134,5	80 ÷ 85

Рис. 5. Изменение $|\Delta\sigma_e^{BT}|$ стволов 85-мм, 100-мм, 152-мм орудий r_2/r_1

Таким образом, для данной схемы восстановления существует возможность снижения прочности металла скрепляющей втулки по сравнению с исходным стволом (для рассмотренных трех базовых конструкций) до 20 единиц категории прочности, что может компенсировать дополнительные затраты на более сложную технологию восстановления (по сравнению с лейнирующей втулкой).

Рассмотрение второго условия работоспособности для данной схемы дает ограничение на максимально допустимый натяг:

$$\gamma_2^{\max} \leq \frac{3\sigma_e^{M/6}}{E} \frac{a_{31} - 1}{a_{21} - 1} \left[\frac{a_{21}}{2a_{31} + a_{21}} - \frac{2a_{31} + a_{21}}{a_{21}(2a_{31} + 1)^2} \right].$$

В диссертации показано, что при вариации толстостенности втулки для трех базовых конструкций стволов во всех случаях данное ограничение не является критическим, т.к. допускаемый максимальный относительный натяг

находится в диапазоне $0,0071 \div 0,0047$, а по условию сборки с применением жидкого азота $\gamma_2^{\max} = 0,0016$.

Применительно к схеме восстановления ствола с помощью скрепляющей втулки был проведен анализ необходимости крепления втулки от проворота под действием момента вращения, передаваемого от снаряда к втулке. Условие отсутствия проворота получено в виде:

$$\gamma_2^{\min} > \frac{\lambda P_{CH}^{\max} S_{KH} \frac{d+t}{2} \operatorname{tg} \alpha}{f E \pi a^* \left(\frac{d}{2} + t\right)^2 l_{BT}^*}$$

где α - угол подъема нарезов;

P_{CH} - давление на дно снаряда;

λ - коэффициент распределения массы снаряда;

f - коэффициент трения;

l_{BT}^* - длина калиберного участка втулки ($l_{BT}^* < l_{BT}$) (рис. 4);

$S_{KH} = n_s d^2$, где n_s - коэффициент, учитывающий нарезы; d - калибр ствола;

$$a^* = \frac{(a_{31} - a_{21})(a_{21} - 1)}{a_{31} - 1}$$

Расчеты подтвердили выполнение данного условия в реальных диапазонах для базовых конструкций соответствующих толстостенностей и натяжений между слоями, что на практике означает отсутствие необходимости дополнительно фиксировать скрепляющую втулку в стволе.

В главе 3 рассмотрены вопросы обеспечения работоспособности восстановленных стволов по критерию нагрева, представлена разработанная методика оценки их износа и живучести и апробация ее для трех базовых конструкций стволов.

Поскольку для восстановленных стволов актуальность большинства аспектов влияния нагрева на работоспособность та же, что и для исходной конструкции, поэтому из приведенного в диссертации полного перечня негативных влияний нагрева на работу орудия выделены те, которые особо проявляются, если ствол восстановлен в ходе ремонта по схеме ДРД - втулки (скрепленной или лейнирующей). Во-первых, и прежде всего это так называемые «пиковые» температуры на внутренней поверхности ствола, т.е.

максимальные температуры в процессе стрельбы как показатели степени повреждаемости металла, прилегающего к поверхности канала ствола. Во-вторых, это так называемой «общий уровень нагрева» т.е. тепловое поле стенки ствола к началу очередного выстрела, определяющее термонапряжённое состояние стенки ствола.

В качестве показателя повреждаемости металла поверхности канала в диссертации предлагается принять температуру начала аустенитного превращение $T_{AI} = 727^{\circ}\text{C}$ (для среднеуглеродистой и высоколегированной хромом и никелем стали). В ряде работе (см, например, сборник трудов международной научно-практической конференции «Проектирование артиллерийских систем» БГТУ, СПб., 2000.) убедительно доказано, что данная температура является надежным индикатором интенсивности структурно-фазовых превращений в приповерхностном слое и, следовательно, его повреждаемости.

Таким образом, укрупненный частный алгоритм решения задачи включает в себя следующие этапы.

1. Расчет параметров внутренней теплоотдачи как функций времени для контрольного сечения ствола (сечения начала полной глубины нарезов).

2. Расчет температурного поля исходного ствола с переменными параметрами теплоотдачи с фиксированием глубины зоны температур, превышающих величину T_{AI} .

3. Расчет температурных полей восстановленного (с помощью ДРД – втулки) ствола с учетом особенностей теплопередачи в составной стенке для скрепленной и лейнирующей втулки, а именно:

- для ствола, восстановленного с помощью скрепленной втулки, предварительный расчет величины контактного давления с установлением величины теплового сопротивления на поверхности контакта втулки и ствола;

- для ствола, восстановленного с помощью лейнирующей втулки, предварительной расчет общего уровня нагрева с установлением величины среднеинтегральной температуры обеспечивающей выбор конструктивного зазора за счет теплового расширения втулки.

4. Сравнительный анализ глубин зон, охваченных температурой, превышающей величину T_{AI} для исходного и восстановленного ствола; обобщение полученных отношений на показатели износа и живучести восстановленного ствола.

Для стволов, восстанавливаемых с помощью скрепленной втулки, методика реализует алгоритм, включающей расчет контактных давлений и тепловые расчеты с граничными условиями, учитывающими тепловое сопротивление на границе «втулка – ствол».

Математическая модель теплового процесса в стволе включает одномерное уравнение нестационарной теплопроводности:

$$a \left[\frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right] - \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = 0$$

и краевые условия, представленные в таблице 3.

Таблица 3

	Начальные условия	Граничные условия:
Для втулки	$T^{BT}(r, t_0) = T_0^{BT}(r)$	При $r = r_1$ $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = -\alpha_r(t)[T_r(t) - T_1(t)]$ при $0 \leq t \leq t_{TD}$; $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 0$ при $t_{TD} \leq t \leq t_{Ц}$. При $r = r_2$ (r_2 - наружный радиус втулки) $-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{R} [T_2^{BT}(t) - T_2^C(t)]$ при $0 \leq t \leq t_{TD}$.
Для ствола	$T^C(r, t_0) = T_0^C(r)$	При $r = r_2$, $-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{R} [T_2^C(t) - T_2^{BT}(t)]$. При $r = r_3$, $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_H [T_{Ж} - T_3(t)]$.

где t_0 и $T_0^{BT}(r)$ - соответственно момент начала очередного цикла теплового нагружения (выстрела) и тепловое поле втулки на этот момент;

$T_1(t)$ - температура на радиусе r_1 ;

$t_{Ц}$ - время цикла «нагрев-охлаждение»;

$t_{TD} = t_{\delta} + t_{ИСТ} - t_{Х}$, (t_{δ} - дульное время; $t_{Х}$ - время подхода снаряда к расчетному сечению; $t_{ИСТ}$ - время периода истечения);

R - тепловое сопротивление контакта;

$T_2^C(t)$ - температура внутренней поверхности ствола (кожуха).

$T_0^C(r)$ - тепловое поле ствола (кожуха) на момент очередного цикла теплового нагружения (выстрела);

$T_3(t)$ - температура на наружной поверхности ствола;

$T_{ж}$ – температура наружного воздуха.

Проведенная серия расчетов при вариации относительной толстостенности втулки и при изменении натяжения в диапазоне $\gamma_2 = 0,0010 \div 0,0015$ дали разброс произведенного скреплением давления P'_2 в пределах $30 \div 60$ МПа. Даже при допущении отсутствии дополнительного давления от разнагретости втулки и ствола, уровень контактного давления превышает значение, определённые для существующих конструкций скрепленных стволов. Это дает основание принимать величину теплового сопротивления контакта по существующим конструкциям.

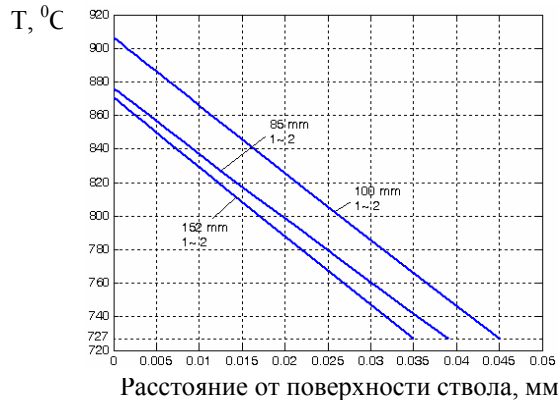


Рис. 6. Температуры по толщине приповерхностного слоя металла: 1 - моноблок; 2 - скрепленный втулкой ствол.

На рис. 6 представлены температурные кривые в поверхностном слое для 85-мм, 100-мм и 152-мм моноблоков и их восстановленных, путем скрепления втулкой, аналогов; при принятых трех значениях наружного радиуса втулки тепловое состояние приповерхностного слоя практически не отличалось.

Практическое совпадение толщин структурно измененных зон всех вариантов со скрепляющей втулкой и исходных моноблоков дает основание полагать, что увеличение показателей износа для стволов практически отсутствует.

Таким образом, и ожидаемая живучесть восстановленного ствола может быть оценена на уровне исходного, что дает основание считать предлагаемое техническое решение приемлемым по критерию долговечности.

Для стволов, восстанавливаемых по схеме лейнирующей втулки, методика реализует алгоритм включающий тепловой расчет с отслеживанием фактических условий теплообмена на границе «втулка – ствол», определяемыми выбором от давления и нагрева или наличием зазора.

Для определения условий теплового контакта втулки и ствола рассмотрены их совместную силовую и тепловую деформацию в трех характерных периодах.

а) До выбора зазора. Втулка деформируется и нагревается без влияния кожуха. Давление в канала ствола P_1^0 , достаточное для выбора зазора, определено из условия совместной силовой и тепловой деформациями втулки.

С учетом обоих факторов для предельного давления в канале ствола, при котором наступает контакт втулки с кожухом, получена зависимость:

$$P_1^0 = E \frac{\alpha^{\rho_1} - 1}{2} (\gamma_\rho - \alpha^T T_{cp}^{BT}).$$

где $T_{cp}^{BT} = \frac{2}{\rho^2 - \rho_1^2} \int_{\rho_1}^{\rho} T(r) r dr$ - среднеинтегральная температура втулки,

α^T - коэффициент теплового расширения металла втулки.

Тепловое состояние втулки на данном периоде ($0 \leq t \leq t_{TD}^*$) определяется одномерным уравнением нестационарной теплопроводности

$$a \left[\frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right] - \frac{\partial T}{\partial t} = 0.$$

и краевыми условиями, представленными в таблице 4.

б) После выбора зазора. Кожух подключён к теплоотводу с наружной поверхности втулки с тепловым сопротивлением на контактной поверхности. Такое положение сохраняется до момента t_{TD}^{**} , который соответствует либо падению давления в канале ствола ниже величины P_1^0 , либо при отсутствии давления, условием выбора зазора за счет разности теплового расширения втулки и кожуха.

Тепловое сопротивление в этот период может быть условно представлено промежуточным слоем малой толщины, соответствующей микро-шероховатости контактируемых поверхностей (Ra2,5, Ra0,63).

Тепловое состояние стенки на данном периоде $t_{ТД}^* \leq t < t_{ТД}^{**}$ определяется одномерным уравнением нестационарной теплопроводности для трехслойной стенки с радиусами r_1, ρ, r_2, r_3 .

Таблица 4

	Начальные условия	Граничные условия:
До выбора зазора	$T^{BT}(r, t_0) = T_0^{BT}(r)$	При $r = r_1$ (r_1 - внутренний радиус втулки) $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = -\alpha_r(t)[T_r(t) - T_1(t)]$ при $0 \leq t \leq t_{ТД}^*$ При $r = \rho$, $\frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_H [T_{жс}(t) - T_\rho^{BT}(t)]$.
После выбора зазора	$T^{BT}(r, t_{ТД}^*) = T_*^{BT}(r)$ при $r_1 \leq r \leq \rho$ и $T_0(r_1, t_{ТД}^*) = T_0$ при $\rho \leq r \leq r_3$,	При $r = r_1$ $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = -\alpha_r(t)[T_r(t) - T_1(t)]$ при $t_{ТД}^* \leq t \leq t_{ТД}$ если $t_{ТД} \leq t_{ТД}^{**}$ и при $t_{ТД}^* \leq t \leq t_{ТД}^{**}$ если $t_{ТД} \geq t_{ТД}^{**}$; $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 0$ при $t_{ТД} \leq t \leq t_{ТД}^{**}$, если $t_{ТД} \leq t_{ТД}^{**}$, При $r = r_3$, $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_H [T_{жс} - T_3(t)]$.

где $T_1(t)$ – температура на радиусе r_1 ,

$t_{ТД}^*$ - время от начала цикла «нагрев-охлаждение» до выбора зазора (т.е. до момента, когда $P_{KH} = P_1^0$);

$T_\rho^{BT}(t)$ – температура наружной поверхности втулки;

$T_*^{BT}(r)$ – тепловое поле втулки в момент выбора зазора;

T_0 – начальная температура кожуха и воздуха в зазоре.

α_H – коэффициент внешней теплоотдачи.

в) После восстановления зазора, начиная с момента $t_{ТД}^{**}$ и до конца цикла $T_{Ц}$ тепловое состояние втулки целиком определяется ее теплоотдачей в окружающую среду, если $t_{ТД}^{**} \geq t_{ТД}$. В противном случае существует промежуток времени $t_{ТД} - t_{ТД}^{**}$, когда в ствол еще поступает тепло от пороховых газов. Математическое описание тепловой задачи для этого периода совпадает

с представленным выше периодом а) с соответствующим изменением начальных условий и граничных условий изнутри.

Расчеты нагрева по данной схеме проводились с вариацией толщины втулки в диапазоне, представленном в табл. 2.

Результаты расчета дают основание предполагать незначительное увеличение показателей износа при сравнении толщин структурно измененных зон втулки и моноблока (при оценке по одиночному выстрелу). При характерной для рассматриваемых орудий невысокой скорострельности очередной выстрел производится при практически остывшем стволе (температура повышается на несколько градусов), что не сказывается существенно на глубину зоны критической температуры. Например, после 20 выстрелов, произведённых за 13 минут увеличение зоны составило 13,5% для ствола 85-мм; после 20 выстрелов за 10 минут 4,8% для ствола 100-мм; и после 20 выстрелов за 20 минут до 7,8% для ствола 152-мм.

Полученные результаты показали возможность восстановления живучести стволов орудий данного класса не ниже уровня 80% от живучести нового ствола при использовании лейнирующих втулок. При использовании скрепленных втулок этот уровень приближен к 100%.

Глава 4 посвящена обоснованию технологической возможности восстановления стволов артиллерийских орудий среднего и крупного калибров.

Сначала рассмотрены общая схема технологического процесса восстановления артстволов, требования к состоянию стволов, годных для восстановления, и так же сформулированы технические требования к стволам как ремонтным заготовкам (РЗ) и втулкам как дополнительным ремонтным деталям (ДРД).

Общая схема технологического процесса восстановления предусматривает предварительную дефектацию артстволов для определения годности к восстановлению предлагаемыми в диссертации способами. Здесь определяются предельные характеристики типовых повреждений (забоин, трещин, раздутий и др.), не превышение которых дает основание отнести ствол к дефектационной группе стволов, годных для восстановления.

В качестве примера на рис. 7 представлены технические требования к изготовлению РЗ ствола и ДРД - втулки 100-мм пушки БС-3.

Механическая обработка ствола для получения ремонтной заготовки при восстановлении отличается от изготовления исходного ствола. Это объясняется возможными деформациями ствола в процессе эксплуатации,

обеспечением необходимой точности взаимного расположения поверхностей, обрабатываемых при восстановлении.

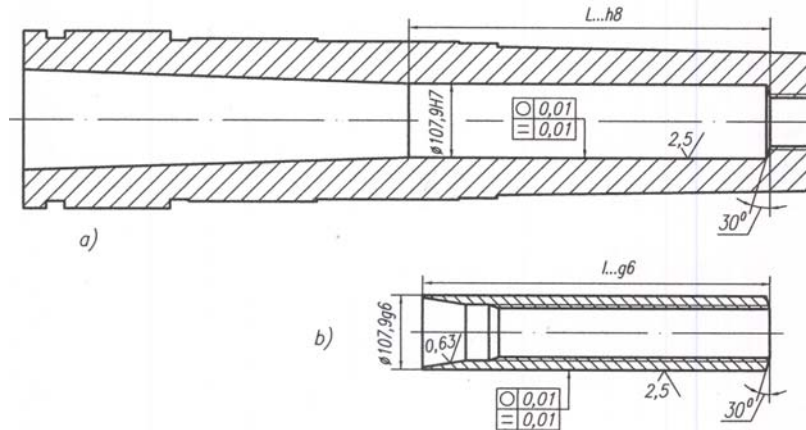


Рис. 7. а) Ремонтная заготовка ствола пушки БС-3; б) Дополнительная ремонтная детали для данного ствола

С учетом этого для получения РЗ ствола в диссертации предлагается:

1. Технологический процесс расточки разделять на ряд установов так, чтобы база для первого установа обеспечивала взаимную точность расположения контактных поверхностей РЗ и ДРД;

2. Во всех установах технологические базы должны совпадать с измерительными, а обработанные поверхности на предшествующем установе должны быть использованы в качестве измерительных баз для последующих установов;

3. Общий припуск распределять следующим образом: 45% на предварительную (черновую) обработку, 30% - на получистовую и 25% на чистовую обработку.

4. Растачивание производить на станках, обеспечивающих закрепление и базирование ствола с помощью двух четырехкулачковых патронов и роликового люнета.

5. Для обеспечения требуемых параметров точности и чистоты поверхности применять специальный режущий инструмент:

- для чернового растачивания однорезцовую расточную головку;
- для чистового растачивания двухрезцовую расточную головку с плавающими пластинами и четыремя направляющими шпонками;

- для подрезки стыковочного торца специальную расточную головку с выдвигаемым резцом;

- хонинговальную головку с алмазными самоустанавливающимися брусками.

Поскольку ДРД - втулка должна быть выполнена так, чтобы при монтаже ствол принял, первоначальные (доэксплуатационные) внутренние размеры его ремонтной части, к ней следует предъявить повышенные требования по погрешностям формы:

- отклонение профиля продольного сечения (конусообразность) определяемое по разности диаметров d_1 и d_2 допускается на длине 100 мм не более $2\Delta_k = d_1 - d_2 = \left(\frac{1}{3} \div \frac{1}{4}\right)\delta_d$, где δ_d - допуск на диаметр направляющей части для исходного (нового) ствола;

- отклонение от круглости (овальность, огранка), определяемое по разности двух взаимно перпендикулярных диаметров d_1 и d'_1 в одном сечении, допускается не более $2\Delta_{об} = d_1 - d'_1 = \left(\frac{1}{3} \div \frac{1}{4}\right)\delta_d$;

- отклонение от прямолинейности оси канала втулки не более $\Delta_c = 2,5d \operatorname{tg} \frac{\varphi}{4}$, где φ - центральный угол, соответствующий допустимому радиусу R изгиба оси ствола (для среднего и крупного калибров $R \cong 500 \div 600$ м).

- величина разностенности готовых втулок не более 0,5мм.

Для выполнения этих требований предлагается технологический процесс разбить на 3 этапа: предварительную механическую обработку, термическую обработку и окончательную механическую обработку.

Для каждого этапа определен техпроцесс, позволяющий сформировать требуемые форму и размеры ДРД – втулки в совокупности с требуемыми механическими характеристиками материала в пределах указанных погрешностей формы.

Получение точных диаметров для обеспечения малых величин абсолютных натягов и зазоров при раздельной обработке втулки и ствола больших габаритов и массы является особой задачей. Поэтому при единичном ремонте рациональное её решение можно получить путем индивидуальной пригонки наружного диаметра втулки по действительному внутреннему диаметру обработанного под РЗ ствола. При этом разность между

действительными диаметрами втулки и ствола, пригнанных под скрепление или лейнирование, должна быть равна заданной величине абсолютного натяга или зазора соответственно.

После растачивания ствола необходимо измерить его действительные внутренние диаметры в 5-10 сечениях, вычислить среднеарифметическое значение d_{BH}^c и далее для пригонки втулки к конкретному стволу наружный диаметр втулки определить как $d_H^{BT} = (d_{BH}^c + q_2) + \delta^{BT}$,

где d_{BH}^c - действительный внутренний диаметр кожуха, мм;

q_2 - требуемая величина абсолютного натяга, мм;

δ^{BT} - допуск на обработку наружной поверхности втулки, мм.

Допуск на обработку наружной поверхности втулки должен быть меньше или равен величине допуска на натяг, т. е. $\delta^{BT} < \delta_n$.

При организации серийного восстановления стволов данная задача решается при помощи селективной сборки.

При обеспечении требуемой точности изготовления РЗ ствола и ДРД-втулки задача качества всего ремонта решается при монтаже и зависит от точности базирования сборочных единиц (в т.ч. минимизацию угла рассогласования нарезов втулки и ствола), гарантированно плотного прилегания торца втулки к стыковочному торцу ствола, надежностью закрепления ремонтной детали (лейнирующей втулки).

Для обеспечения данных требований разработана специальная оснастка (монтажные оправки). Одна из конструкций для лейнирующей втулки представлена на рис. 8.

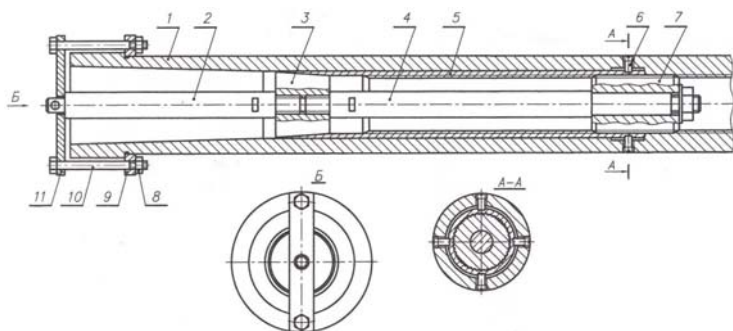


Рис. 8. К технологии монтажа лейнирующей втулки: 1 - Ствол; 2, 4 - Ось; 3 - Конус; 5 - Втулка; 6 - Штифт; 7 - Монтажная нарезная оправка; 8 - гайка; 9 - Кольцо; 10 - Болт; 11 - Планка.

Монтажная оправка обеспечивает совмещение в стыке нарезов втулки с нарезам ствола, а так же с помощью поджимных устройств гарантирует плотное прилегание стыковочных поверхностей (рис. 8). Конус 4 осуществляет осевую базировку втулки, он соединен с помощью оси 5 с монтажной нарезной оправкой 7, наружная поверхность которой соответствует контуру поперечного сечения нарезной части канала ствола.

- для придания стволу, имеющему критический износ канала, качества ремонтной детали имеются необходимые технологические приемы, инструмент, оснастка и оборудование.

- изготовление дополнительных ремонтных деталей в виде тонкостенной трубы с нарезами может быть осуществлено с применением современных технологий; требуемая точность, чистота обработки и отсутствие недопустимых погрешностей обеспечиваются.

- монтаж ремонтной детали с подготовленным для сборки стволом может быть осуществлен при применении универсальной и специальной оснастки в условиях артиллерийского ремонтного предприятия.

Далее в четвертой главе представлен алгоритм оценки экономической эффективности восстановления артстволов и предложены критерии для оценки эффективности как операции восстановления ствола в целом, так и альтернативных вариантов восстановления между собой.

Каждая из представленных на рис. 9 операция (группа операций) должна быть оценена по всем составляющим себестоимости C_i с учетом условий производства на конкретном ремонтном предприятии. Особое внимание следует обратить на определяющие для каждого варианта операции стоимости оборудования, специальных материалов, оригинальной технологической оснастки. Так, в первую очередь, следует иметь в виду наличие в станочном парке предприятия крупных, мощных радиально-сверлильных станков (лейнирующая втулка) или альтернативных им станков для обработки глубоких отверстий (скрепляющая втулка), условий для работы с жидким азотом, наличие соответствующей квалификации рабочих и условий безопасности.

Для выбора оптимального варианта восстановления ствола орудия с помощью ДРД - втулки (лейнирующей или скрепляющей) предлагается использовать критерий эффективности восстановления в виде:

$$k = \frac{C_i \cdot i_i}{I},$$

где C_i – технологическая стоимость восстановления i -ым способом;
 i_i – интенсивность изнашиваемости детали, мкм/выстрел;
 I – величина предельного износа детали, мкм.

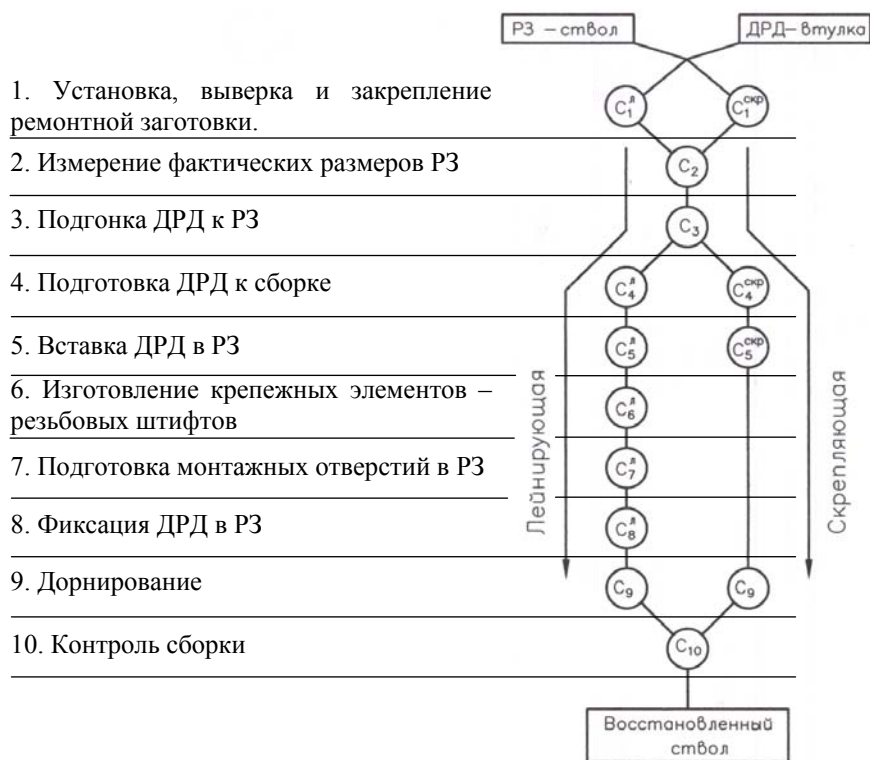


Рис. 9. Граф вариантов ТП восстановления стволов

При наличии двух альтернативных вариантов восстановления ствола данный критерий примет вид:

$$k_l = \frac{C_l \cdot i_l}{\Delta d_{\Pi}}, \quad k_{скр} = \frac{C_{скр} \cdot i_{скр}}{\Delta d_{\Pi}},$$

где C_l , $C_{скр}$ – технологическая стоимость восстановления соответствующим способом;

i_l , $i_{скр}$ – интенсивность износа ствола соответственно с лейнирующей или скрепленной втулкой, мкм/выстрел;

Δd_{Π} – величина предельного износа ствола, мкм.

По предложенным критериям для выбора более эффективного способа восстановления ствола, были проведены предварительные оценки, которые показали, что оба способа восстановления стволов экономически близки по затратам. Выбор способа зависит от конкретных условий организации восстановленного производства.

Заключение. В результате проведенных в данной диссертационной работе исследований получены следующие результаты.

1. Сформулированные общие требования к восстановленным стволам и проведенный анализ задачи их восстановления различными способами позволил выделить рациональную область технических решений – применение дополнительных ремонтных деталей в виде втулок.

2. Сформулированы и обоснованы с позиций технологической осуществимости конструктивные предложения по восстановлению артстволов среднего и крупного калибров с помощью лейнирующих и скрепленных втулок.

3. Поставлена и решена задача обеспечения прочности восстановленных стволов как задача определения конструктивно-технологических параметров восстановления, которые обеспечили бы показатели прочности восстановленных стволов не менее, чем у исходной конструкции. Ее результаты:

- необходимое увеличение прочности металла лейнирующей втулки по сравнению с исходным стволом для трех базовых конструкций 85, 100 и 152 мм калибра не превышает 15 единиц категории прочности;

- возможность снижения прочности металла скрепляющей втулки по сравнению с исходным стволом (для рассмотренных трех базовых конструкций) в пределах до 20 единиц категории прочности.

4. Рассмотрение особенностей теплопередачи в составных конструкциях восстанавливаемых стволов и критический анализ допущений, обычно принимаемых при рассмотрении теплового процесса в артстволах, дали основания сформировать частные математические модели теплового процесса в восстановленных стволах. Данные модели позволяют учесть влияние на общий уровень нагрева и на максимальные температуры поверхности канала ствола:

- для стволов, восстановленных с помощью скрепляющей втулки - тепловое сопротивление на поверхности контакта втулки;

- для стволов, восстановленных с помощью лейнирующей втулки - наличие конструктивного зазора и возможность его выбора как от действия давления при выстреле так и от нагрева.

5. Разработана методика оценки нагрева, износа и живучести восстановленных стволов. Полученные результаты показали возможность восстановления стволов орудий данного класса не ниже уровня 80% от живучести нового ствола при использовании лейнирующих втулок. При использовании скрепленных втулок этот уровень приближен к 100%.

6. Разработаны технологические требования к ремонтной заготовке ствола, ДРД – втулки и сборке втулки в стволе.

7. Доказана технологическая осуществимость всех операции по восстановлению ствола: технологического процесса расточки ствола, изготовления ДРД – втулки и их монтажа.

8. Предложены критерии для выбора более эффективного способа восстановления ствола. Проведенные предварительные оценки, показывают, что оба предложенных способа восстановления стволов экономически обоснованы. Выбор способа зависит от конкретных условий организации восстановительного производства.

Публикации по теме диссертации

1. Нгуен Чыонг Шинь. О возможности восстановления артиллерийских стволов, исчерпавших свой технический ресурс по показателям износа канала. // Сборник трудов студентов, магистратов, аспирантов и молодых ученых БГТУ. Вып 2. СПб., 2004. С. 126-130.

2. Нгуен Чыонг Шинь. О возможности восстановления артиллерийских стволов с помощью скрепления втулкой. // Вторые Уткинские чтения: мат общерос. науч.-техн. конф. Т2. СПб., 2005. С. 210-215.

3. Нгуен Чыонг Шинь. Тепловой аспект работоспособности артиллерийских стволов, восстановленного с помощью скрепления втулкой. // Сборник трудов студентов, магистратов, аспирантов и молодых ученых БГТУ. Вып 3. СПб., 2005. С. 116-119.

4. Нгуен Чыонг Шинь. Тепловой аспект работоспособности артиллерийского ствола, восстановленного с помощью лейнирующей втулки. // Сборник трудов студентов, магистратов, аспирантов и молодых ученых БГТУ. Вып 3. СПб., 2005. С. 111-115.

5. Обоснование технологической возможности восстановления артиллерийских стволов среднего и крупного калибров. // Сборник трудов студентов, магистратов, аспирантов и молодых ученых БГТУ. Вып 4. СПб., 2006. С. 96-99.

Подписано в печатьФормат 60 х 84/16. Бумага документная.
Печать трафаретная. Уч.-изд л.1,0. Тираж 100 экз.

Заказ №. 133

Балтийский Государственный Технический Университет

Типография БГТУ

190005, Санкт – Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1.