

✓
М 179517
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

В. К. КОСТРИК

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ОБЖИМА КОНЦА ТОНКОСТЕННОЙ ТРУБЧАТОЙ
ЗАГОТОВКИ**

(05.324—Обработка металлов давлением)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Омском политехническом институте и в МВТУ им. Баумана.

Научные руководители:

кандидат технических наук, доцент **Фейгин М. М.**,
кандидат технических наук, доцент **Колесников С. М.**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Исаченков Е. И.**,
кандидат технических наук **Легчилин А. И.**

Ведущее предприятие — Омский телевизионный завод.

сданы в архив

ОУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
1972 г.
1972 г.

матизации и механизации
умана по адресу: Моск-

завёренных печатью,
есу.

и в библиотеке МВТУ.

М189517

Ю. Степанов

МВТУ
СП. Н. В. СТУДЕНТ
БИБЛИОТЕКА



1179517

Кострик В.К. Исследование

ВВЕДЕНИЕ

В промышленности используется большое количество трубчатых деталей с оформлением концевой части в виде конуса, сферы или плоского дна. Такие детали обычно изготавливают путем обжима концевой части трубчатой заготовки в штампах, на ротационно-ковочных машинах, или на токарно-давилых станках.

Обжим в штампах — наиболее распространенный способ осуществления этой операции, но его технологические возможности ограничены потерей устойчивости заготовки, которая при относительной толщине стенки заготовки $S_0/D_0 \leq 0,03$, как правило, происходит в окружном, а при $S_0/D_0 > 0,03$ — в осевом направлении.

Обжим заготовок с $S_0/D_0 > 0,03$ на практике обычно не встречает затруднений. Путем применения многопереходной штамповки, штампов с подпорами и с нагревом очага пластической деформации при относительно небольшом числе переходов получают значительные степени деформации.

Обжим заготовок с $S_0/D_0 \leq 0,03$ связан с существенными трудностями из-за малых предельных степеней деформаций. В настоящее время еще не разработано достаточно эффективных способов интенсификации процесса обжима таких заготовок, поэтому поиск этих способов является актуальной задачей.

Обжим на ротационно-ковочных машинах и на давилых станках является весьма трудоемким процессом.

Одним из эффективных путей интенсификации процесса обжима тонкостенных заготовок, как показано в работах Е.И.Исаченко, А.И.Гороховича и В.А.Щербины, является повышение скорости деформирования, которое приводит к существенному увеличению устойчивости заготовки и повышению предельных степеней деформации. Как показывает анализ технологических возможностей существующих способов высокоскоростной штамповки, наиболее перспективным способом осуществления обжима тонкостенных заготовок малых и средних габаритов является электромагнитная штамповка. Но применение этого способа сдерживается слабой теоретической и экспериментальной разработкой процесса.

В соответствии с изложенным целью работы явилось теоретическое и экспериментальное исследование технологических возможностей и особенностей электромагнитного обжима конца тонкостенной трубчатой заготовки и разработка на основе результатов исследования инженерной методики расчета процесса и внедрение его в производство.

Работа состоит из введения, пяти глав и общих выводов.

Г Л А В А I

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

В начале главы приведен анализ существующих методов решения задач высокоскоростного деформирования: метод, основанный на решении общих уравнений механики сплошных сред, разработанный Ю.Н.Алексеевым; энергетический и вариационный методы, обоснование возможности применения которых сделано соответственно В.Ф.Радзивончиком и В.М.Старковым и метод решения уравнений движения с принятием либо модели упруго-пластического упрочняющегося тела, либо — идеально-жестко-пластического тела, разработанный Х.А.Рахматулиным, Ю.А.Демьяновым, Г.С.Шапиро, Б.А.Щегловым, О.Д.Антоненковым, Ф.Г.Ходжем, Г.Гопкинсом, В.Прагером и др.

На основании проведенного анализа сделан вывод, что наиболее рациональным для теоретического анализа рассматриваемый операции является метод решения уравнений движения с принятием модели идеального жестко-пластического тела, т.к. он сравнительно прост, достаточно точно описывает реальную картину деформирования и, главное, позволяет определить перемещение и форму заготовки на стадии разгона, что при исследовании электромагнитного обжима является весьма важным.

Обзор работ по динамическому обжиму труб показал, что, несмотря на установленное положительное влияние повышения скорости на устойчивость заготовки при обжиме, вопросам теоретического и экспериментального исследования высокоскоростного обжима посвящено ограниченное число работ, и процесс исследован слабо. Исследования, в основном, сделаны для свободного обжима в относительно узком диапазоне скоростей перемещения заготовки и носят несистематичный характер. В литературе отсутствуют данные о технологических возможностях и особенностях электромагнитного обжима конца трубы по

оправке, о напряженно-деформированном состоянии заготовки, а также указания о методике расчета этой операции.

На основании проведенного обзора были в работе поставлены следующие задачи:

- а) теоретическое и экспериментальное исследование кинематики и механизма деформирования при электромагнитном обжиме конца трубчатой заготовки;
- б) экспериментальное исследование механизма потери поперечной устойчивости заготовки с определением величин предельных коэффициентов электромагнитного обжима;
- в) экспериментальное исследование деформированного состояния при электромагнитном обжиме конца трубчатой заготовки;
- г) разработка инженерной методики расчета силовых и энергетических параметров процесса и размеров заготовки;
- д) экспериментальная проверка инженерной методики и внедрение процесса электромагнитного обжима в производство.

Г Л А В А П

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОБЖИМА КОНЦА ТРУБЧАТОЙ ЗАГОТОВКИ

Задача об электромагнитном обжиме конца трубы по оправке с плоским торцом сведена к задаче о деформировании конусо-заземленной трубы импульсом внешнего давления.

Учитывая, что полная система уравнений для решения этой задачи весьма сложна, было решено провести теоретический анализ по упрощенной методике, примененной Ф.Г.Ходжем, которая предусматривает принятие жестко-идеально-пластической модели тела, пренебрежение геометрической изменяемостью обрезающей заготовки и осевыми перемещениями и напряжением. При этих допущениях уравнение движения в безразмерных параметрах имеет вид:

$$\frac{1}{2c^2} \left(\frac{\partial^2 m}{\partial \bar{x}^2} \right) + n_\theta - \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \bar{t}^2} + \bar{p} = 0, \quad (I)$$

где: m - осевой изгибающий момент; c - параметр, характеризующий размеры обжимаемой части заготовки; $\bar{x}$ - осевая координата; n_θ - тангенциальная сила; $\bar{W}$ - радиальное перемещение; $\bar{t}$ - время; $\bar{p}$ - давление.

При решении уравнения принимали ассоциированный закон

течения и упрощенное условие пластичности, заданное в обобщенных напряжениях в форме четырехугольника текучести в координатах $M-N$; давление магнитного поля осредняли по осевой координате и по времени; полагали, что обжим происходит без потери устойчивости заготовки.

В результате совместного решения уравнения движения (I) и условия пластичности при соответствующих граничных и начальных условиях и условиях непрерывности получены формулы для определения изгибающего момента, тангенциальной силы, перемещения, скорости и ускорения стенки заготовки. Решение показало, что в зависимости от значений $\bar{p}$ и C существует четыре различных случая поведения заготовки.

Образующие короткой ($C \leq \sqrt{3}$) и длинной ($C > \sqrt{3}$) заготовок при умеренной ($\bar{p}_{cr} \leq \bar{p} \leq \bar{p}_1 + \frac{13.8}{C}$) нагрузке на стадии разгона не искривляются, т.е. конец заготовки имеет форму усеченного конуса; образующая короткой заготовки на стадии торможения также не искривляется, а образующая длинной заготовки разделена подвижной шарнирной окружностью на две части: зона между заземлением и подвижным шарниром постоянно выходит из процесса пластического деформирования, а другая зона продолжает движение до остановки в форме усеченного конуса.

Решение для случая обжима короткой заготовки высокой ($\bar{p} > \bar{p}_1$) нагрузкой показало: на стадии разгона заготовка представляет собой совокупность двух усеченных конусов, соединенных неподвижной шарнирной окружностью; на стадии торможения форма заготовки до определенного момента сохраняется, но шарнирная окружность, постепенно замедляясь, движется к свободному краю заготовки до тех пор, пока не остановится, а образующая не выпрямится; в конце процесса образующая заготовки так же, как и при умеренной нагрузке, не искривлена, т.е. конец заготовки имеет форму усеченного конуса.

Поведение длинной заготовки при высокой нагрузке на стадии разгона аналогично поведению короткой заготовки, а на стадии торможения решения для них совпадают при $C \leq \sqrt{4.4}$; для более длинных заготовок проведение решения было признано нецелесообразным из-за его сложности и малой практической ценности.

Г Л А В А Ш

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОБЖИМА

Основной задачей экспериментального исследования кинематики и механизма деформирования при электромагнитном обжиме трубы по оправке с плоским торцом являлась проверка влияния на поведение заготовки двух основных установленных теоретическим анализом факторов: величины деформирующего давления и длины заготовки, а также проверка полученных расчетных формул. В соответствии с задачами работы было также необходимо провести исследование влияния аналогичных факторов при электромагнитном обжиме труб по коническим оправкам и оправкам с криволинейной образующей.

На основе анализа существующих методов измерения деформирующего давления был выбран кинематический метод, основанный на регистрации скоростным фотографированием перемещения стенки заготовки на стадии разгона и последующем пересчете данных по формуле Лапласа с учетом инерционных сил.

Для исследования кинематики и механизма деформирования был применен также метод скоростного фотографирования перемещения образующей образцов в процессе обжима.

Основными исследуемыми факторами, влияющими на устойчивость и предельный коэффициент обжима являлись: максимальная скорость перемещения стенки заготовки, ее относительная толщина, модуль упрочнения и плотность материала заготовки, а также условия закрепления заготовки.

Варьируемыми параметрами при проведении экспериментов служили: энергия разряда установки, материал и размеры образцов, а также условия на краю заготовки (свободный обжим и обжим с защемлением края заготовки). Скорость стенки образца и момент потери устойчивости определяли по кинограммам. Критерием потери устойчивости служило образование складок высотой более трети толщины заготовки.

Испытанию подвергали кольцевые и трубчатые термообработанные образцы из алюминиевого сплава АМЦМ, меди марки М2 и латуни марки Л62 с наружным диаметром 27 мм и толщиной 1 мм и наружным диаметром 40 мм и толщиной 1; 0,8; 0,6

и 0,4 мм. Учет скоростной зависимости сопротивления деформированию проводили путем использования коэффициентов динамичности.

Для выполнения экспериментов была спроектирована и изготовлена магнитно-импульсная установка МИУ-20 с максимальной запасаемой энергией 20 кдж, максимальным напряжением 30 кВ и собственной частотой разряда 67 кгц. Для обжима в одновитковых индукторах был спроектирован и изготовлен импульсный кабельный трансформатор с выходной индуктивностью 0,04 мкГн. Сравнительные эксперименты по статическому обжиму выполняли на гидравлической разрывной машине ГРМ-1.

Оснасткой при электромагнитном обжиме служили одновитковые и многовитковые цилиндрические индукторы и оправки с углом конусности от 10 до 90° и радиусом скругленной кромки торца от 1,5 до 19 мм. Исследование потери устойчивости в статических условиях проводили в специальном штампе с резиной.

Для регистрации электрических параметров разрядной цепи были использованы пояс Роговского, емкостный делитель напряжения и импульсный осциллограф ОК-17 м, а для регистрации движения заготовки во время процесса электромагнитного обжима — сверхскоростная фоторегистрирующая установка СФР-2 М. Съемку вели в режиме лупы времени τ проходящем и отраженном свете со скоростями 375000 и 625000 $\frac{\text{кадр}}{\text{сек}}$. При проведении экспериментов по статическому обжиму последовательные стадии обжима регистрировали путем фотографирования процесса фотоаппаратом "Зенит -3С".

необходимость фиксации формы образующей образцов в процессе деформирования потребовала разработки специальной методики, основанной на применении скоростной киносъемки. Для качественного изучения объемной картины деформирования съемку конца трубы вели под углом в отраженном свете, что позволяло одновременно следить за движением образующей и образованием складок на заготовке. Количественные данные о кинематических параметрах определяли с помощью съемки образующей заготовки в проходящем свете с применением щелевого одновиткового индуктора.

Исследование деформированного состояния образцов осуществляли методом делительной сетки и измерением толщины

обжатых образцов.

В конце главы выполнена оценка точности планируемого экспериментального исследования, которая показала, что ожидаемые максимальные погрешности равны: при определении перемещения $-2,2\%$, скорости $-11,5\%$, ускорения $-17,3\%$, давления $-17,7\%$. Наряду с этим при обработке экспериментальных данных для определения их точности проводили статистическую обработку результатов экспериментов.

Г Л А В А I У

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальное исследование кинематики и механизма деформирования при электромагнитном обжиме по оправке с плоским торцем показало хорошую качественную сходимость экспериментальных данных с расчетными для всего процесса деформирования и хорошее количественное совпадение результатов на стадии разгона (расхождение при определении перемещения свободной кромки заготовки в конце стадии разгона было в пределах $5+15\%$). Как и предполагает теоретический анализ, расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями перемещения увеличивалось с ростом перемещений.

Сравнение теоретической и экспериментальной форм образующей образцов показало, что при обжиме высокой нагрузкой между ними имеются некоторые отличия, основными из которых являются: отсутствие резких перегибов образующей и нестационарность шарнира на стадии разгона. В работе показано, что эти различия являются следствием принятых при теоретическом анализе допущений.

Экспериментальное исследование обжима по конической оправке и по оправке с криволинейной образующей позволило установить, что до встречи с оправкой заготовка деформируется так же, как и при обжиме по оправке с плоским торцем. После встречи с оправкой, в отличие от обжима по оправке с плоским торцем, образуется искусственный пластический шарнир, который движется по поверхности оправки, оставляя за собой вышедшую из процесса пластической деформации часть заготовки; в конце процесса происходит поворот образующей концевой

части заготовки до встречи с оправкой, сопровождающийся значительным ее ускорением (эффект "хлыста").

Исследование поперечной устойчивости трубчатой заготовки при свободном обжиме и обжиме по оправкам в диапазоне скоростей перемещения стенки от 2 мм/мин до 800 м/сек показало, что помимо влияния относительной толщины и модуля упругости материала заготовки существенную роль в повышении ее устойчивости играют скорость деформирования, плотность материала заготовки и условия ее закрепления.

Повышение скорости деформирования приводит к монотонному повышению устойчивости заготовки; причем эта зависимость ослабевает с ростом абсолютных значений скорости и при скорости свыше 500 м/сек дальнейшее повышение скорости практически не оказывает влияния на устойчивость. Путем анализа механизма потери устойчивости установлено, что основными причинами повышения устойчивости заготовки с увеличением скорости деформирования являются следующие: поддерживающее влияние магнитного давления, рост числа складок, увеличение толщины стенки заготовки и поддерживающее влияние относительного ускорения элементов заготовки. Увеличение плотности материала заготовки также увеличивает ее устойчивость. Закрепление конца заготовки несколько уменьшает предельный коэффициент обжима, что обусловлено ускорением конца заготовки в последней стадии процесса и поддерживающим влиянием зоны заготовки, примыкающей к месту закрепления.

Кроме того эксперименты показали, что заготовка, как правило, теряет устойчивость в начале стадии торможения, поэтому производить свободный обжим (без оправки) тонкостенных заготовок не представляется возможным. Наиболее вероятной причиной высокой устойчивости заготовки на стадии разгона является поддерживающее влияние магнитного давления.

Из-за слабого влияния скорости перемещения свыше 500 м/сек на устойчивость заготовки и технологических трудностей (прижог, приварка, воздушные пузыри) предлагается скорость 500 м/сек при обжиме по оправке ^{считается} предельной, а коэффициент обжима при этой скорости — предельным динамическим. Динамический предельный коэффициент обжима в 2,2,5 ра-

за меньше статического и значительно слабее зависит от относительной толщины заготовки, чем статический; он практически не зависит от формы оправки и в среднем с точностью в $5\pm 6\%$ составляет для алюминиевых сплавов $-0,6$, а для медных $-0,4$.

Экспериментальным исследованием распределения конечных деформаций по длине образующей заготовки при электромагнитном обжиме установлены существенные отличия деформированного состояния при электромагнитном обжиме и обжиме в матрицах. Основными из них являются: меньшая толщина заготовки, полученной электромагнитным обжимом, которая вблизи места перехода цилиндрической части в коническую или криволинейную может быть менее начальной толщины заготовки; утонение заготовки растет с увеличением угла конусности и уменьшением радиуса скругления кромки торца оправки, достигая при больших углах конусности ($\alpha > 45^\circ$) и малых радиусах ($\frac{r_c}{d} < 0,05$) значительных величин, способных привести к отрыву обжимаемой части заготовки. Особенности деформированного состояния при электромагнитном обжиме объяснены на основе анализа изменения меридионального напряжения вдоль образующей заготовки.

Г Л А В А У

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОБЖИМА КОНЦА ТОНКОСТЕННОЙ ТРУБЧАТОЙ ЗАГОТОВКИ И ВНЕДРЕНИЕ ПРОЦЕССА В ПРОИЗВОДСТВО

Результаты теоретического и экспериментального исследования электромагнитного обжима позволили разработать инженерную методику расчета операции, дающую возможность, исходя из размеров детали, рассчитать основные параметры процесса, т.е. деформирующее давление и энергию разряда установки, размеры заготовки, а также дать рекомендации по предельным величинам коэффициентов электромагнитного обжима.

Вследствие различия механизма деформирования при умеренной и высокой нагрузках методика расчета для этих случаев также различна.

Исходными данными при выводе формул для расчета давления служили теоретические зависимости, связывающие давление и перемещение.

Расчет давления при умеренной нагрузке производили из того, что заготовка теряет устойчивость в начале стадии торможения, а при расчете длины заготовки опирались на предположение о движении всех элементов образующей конца заготовки по радиусам перпендикулярно ее оси.

При обжиме высокой нагрузкой по конической оправке процесс схематизировали следующим образом: во время действия давления все элементы образующей заготовки перемещаются по радиусам перпендикулярно к ее оси и искусственный шарнир движется по поверхности оправки; в момент окончания действия давления шарнир останавливается, и образующая свободного конца заготовки поворачивается (без удлинения) до встречи с оправкой. Осевая координата шарнира в момент его остановки на основании теоретического и экспериментального исследования принята равной 0,65 исходной длины обжимаемого конца заготовки.

При выводе формул для расчета длины заготовки при обжиме высокой нагрузкой по оправке со скругленной кромкой торца рассмотрено три случая в зависимости от соотношения величины конечного перемещения свободной кромки заготовки, осевой координаты окружного шарнира в момент его остановки и радиуса скругленной кромки торца оправки.

Методика приближенного расчета запасаемой в конденсаторной батарее энергии и частоты разрядного контура выполнена на основе работ Ю.А.Попова.

Разработанная методика инженерного расчета процесса электромагнитного обжима проверена экспериментально. Проверка показала удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных: их расхождения по энергии составляли не более 28%, а по длине заготовки — не более 1%.

Внедрение процесса электромагнитного обжима осуществлено на Омском телевизионном заводе с 1966 года. За истекшее время спроектирована, изготовлена и отлажена магнитно-импульсная установка ИИУ-45/50 промышленного типа с максимальной запасаемой энергией 45 кДж, спроектирован, изготовлен и испытан в производственных условиях инструмент для проведения процесса, разработаны рекомендации по проектированию стойкого инструмента, технологическим смазкам и другим вопросам практического характера.

В результате проделанной работы на указанном заводе переведено с механической обработки на способ электромагнитного обжима пятнадцать наименований деталей, организован участок электромагнитной штамповки со штатом пять человек.

Расчет экономической эффективности по освоенной и внедренной номенклатуре показал, что трудоемкость изготовления деталей по сравнению с ранее существовавшей технологией уменьшилась в среднем на 30-60%.

ВЫВОДЫ

1. Проведен теоретический анализ процесса электромагнитного обжима конца трубчатой заготовки путем решения уравнения движения цилиндрической консольно заземленной оболочки из идеального жестко-пластического материала под действием равномерного прямоугольного импульса внешнего давления, в предположении отсутствия осевых напряжений и деформаций; в результате получены формулы связи давления с кинематическими параметрами для различных комбинаций давления и длины заготовки, пригодные для практического использования; установлено, что механизм деформирования заготовки определяется величинами давления и длины обжимаемого конца заготовки.

2. Разработаны методика и изготовлены оборудование и оснастка для регистрации формы образующей конца трубчатой заготовки, исследования потери ее устойчивости и технологических возможностей при электромагнитном и статическом обжиме в диапазоне скоростей перемещения $2 \frac{\text{мм}}{\text{мин}} \div 800 \text{ м/сек.}$

3. Проведено экспериментальное исследование кинематики и механизма деформирования при электромагнитном обжиме конца трубчатой заготовки; сравнение экспериментальных данных с расчетными показало их хорошую качественную сходимость для всего процесса деформирования и хорошую количественную сходимость (с точностью 5-15%) на стадии разгона.

4. Проведено экспериментальное исследование факторов, влияющих на поперечную устойчивость трубчатой заготовки при свободном обжиме и обжиме по оправке в диапазоне скоростей $2 \frac{\text{мм}}{\text{мин}} \div 800 \text{ м/сек.}$; обнаружено, что, как правило, заготовка теряет устойчивость в начале стадии торможения, поэтому получить тонкостенные детали электромагнитным обжимом без мо-

пользования оправки не представляется возможным; увеличение скорости деформирования от $2 \frac{\text{мм}}{\text{мин}}$ до $500 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ позволяет вне зависимости от формы оправки уменьшить коэффициент обжима до 0,6 для алюминиевых и 0,4 для медных сплавов (в 2+2,5 раза); дальнейшее увеличение скорости практически на устойчивости не сказывается и не рационально по ряду технологических условий.

5. Эксперименты позволили установить существенные отличия деформированного состояния заготовки при электромагнитном и статическом способах обжима: толщина стенки детали в первом случае всегда меньше.

6. Разработана инженерная методика расчета давления магнитного поля, энергии заряда установки и размеров обжимаемой части заготовки при электромагнитном обжиме; экспериментальная проверка методики показала, что она обеспечивает достаточную для практики точность расчетов (в пределах 25%).

7. Результаты работы были использованы при внедрении 15 наименований деталей на участке электромагнитной штамповки Омского телевизионного завода; при проведении внедрения разработаны рекомендации по конструированию стойкого инструмента, применению технологических смазок и другим вопросам практического характера; опыт использования электромагнитного обжима в производственных условиях показал, что его применение снижает трудоемкость на 30+60% при существенном улучшении качества изделий.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. ФЕЙГИН М.М., КОСТРИК В.К. Некоторые особенности обжима трубчатых заготовок импульсным магнитным полем. "Кузнечно-штамповочное производство", № 7, 1969.
2. КОСТРИК В.К. Некоторые вопросы штамповки металлов импульсным магнитным полем. Вопросы кузнечно-прессового и литейного производства. Материалы юбилейной конференции МСФ, Омский политехнический институт, г.Омск, 1970.
3. КОСТРИК В.К. Установка для магнитно-импульсной штамповки металлов. Информационный листок № 109-70, ЦИТИ, г.Омск. 1970.

4. ФЕЙГИН М.М., КОСТРИК В.К. Экспериментальное исследование кинематики движения заготовки при электромагнитном обжиме. Сб.трудов № I, МСФ. Омский политехнический институт, г.Омск, 1970.
5. ФЕЙГИН М.М., КОСТРИК В.К., КОЛЕСНИКОВ В.М., КАЛИНИН Б.И. Экспериментальная установка для магнитно-импульсной обработки металлов. Машины и технология обработки металлов давлением и литейное производство. Сб.трудов МСФ, Омский политехнический институт, г.Омск, 1971.