

# ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРЕССОВОГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

## MANUFACTURE PRESSING TOOL OF CAST IRON SPHEROIDAL GRAPHITE

Буркин С.П., Бабайлов Н.А., Разинкин А.В.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, spb@mtf.ustu.ru

The technology of production of deformed workpieces made of spheroidal graphite cast iron for pressing tool. The peculiarity of these pieces lies in its high performance which are caused by a compact form of graphite. Pressing tool made of these pieces, suitable for the production of aluminum profiles with high-quality surface. The main elements of the new technology are as follows: modification molten iron, the formation of hollow pieces on the floor mold, heat treatment of castings, special deformation pattern in the manufacture of press matrices, finish machining.

Keywords: spheroidal graphite cast iron, melt modification, closed sludge, flash, drawing with thinning.

### Введение

В настоящее время актуальными становятся задачи, связанные с изготовлением прессового инструмента для прессования алюминиевых сплавов. Это связано с адгезионным взаимодействием инструмента и деформируемого металла, которое возникает при прессовании алюминиевых сплавов по причине относительно низких скоростей прессования и интенсивной пластической деформацией заготовок. В некоторой степени решением данной задачи может стать использование деформированных заготовок из чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ) для изготовления указанного инструмента.

### Общая технология производства изделий из ЧШГ

В настоящей работе рассматривается технология изготовления деформированных заготовок из ЧШГ для изготовления прессового инструмента. Особенность применения заготовок из ЧШГ заключается в его высоких эксплуатационных свойствах, которые обусловлены компактной (шаровидной) формой графита [1]. Основные моменты технологии заключаются в следующем: сфероидизирующее и инокулирующее модифицирование расплава чугуна, намораживание заготовки на полый охлаждаемый кристаллизатор, термическая обработка отливок, деформация, термическая обработка заготовок и механическая обработка.

Вопросы сфероидизирующего и инокулирующего модифицирования расплава чугуна в данной работе не рассматриваются, не рассматриваются также вопросы термической обработки, так как эти данные широко изложены в литературе [1]. Определенный интерес представляют процессы получения литой заготовки и ее последующей деформации. Так, при литье ставится задача получения «бездефектной» литой заготовки с однородной мелкозернистой структурой. Решением этой задачи может стать получение полых заготовок методом намораживания на полый охлаждаемый кристаллизатор. Описанию основных моментов технологии этого передела посвящена первая часть работы. Вторая часть посвящена изучению сочетания процессов деформации полых литых

заготовок, для формирования равноосной структуры заготовок.

### Исследование технологических особенностей процесса получения литой заготовки

При проведении теоретического анализа методом конечных элементов принято, что заготовка получается методом намораживания металла на полый охлаждаемый кристаллизатор, опускаемый на определенное время в расплав чугуна. В качестве технологических параметров, которые необходимо определить являлись:

- время затвердевания заготовки в зависимости от технологических параметров процесса разливки;
- увеличение толщины намораживаемой стенки до заданного отношения внутреннего к наружному диаметру  $d/D$  (построение кинетических кривых затвердевания) в зависимости от технологических параметров процесса разливки;
- влияние степени перегрева расплава металла на указанные характеристики.

Первый параметр необходим для определения производительности процесса кристаллизации, поскольку время действия модификаторов в чугуне ограничено и составляет не более 20...30 минут. Это связано с интенсивным выгоранием и испарением мелких частиц в расплаве чугуна. По истечении этого времени необходимо оставшийся расплав чугуна подогреть до температуры порядка  $1430^{\circ}\text{C}$  и заново модифицировать этими же лигатурами в количестве на 10...20% меньше, чем при первом модифицировании. Второй показатель необходим, чтобы проектировать технологический процесс получения заготовки. Третий показатель необходимо учитывать по причине возможного подогрева расплава чугуна после модифицирования.

Решение задачи выполняется в осесимметричной постановке (рис.1) при внутреннем радиусе кристаллизатора  $R_B = 0,065$  м; внутреннем радиусе разливочного ковша  $R_A = 0,25$  м;  $h = 0,012$  м; наружном радиусе кристаллизатора

$R_H = R_B + S$ ; толщине стенки кристаллизатора

$S = 10$  мм; материал кристаллизатора – медь марки М1.

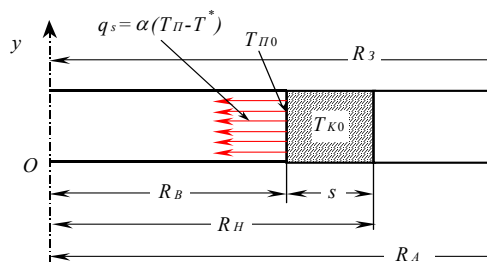


Рис. 1. Расчетная схема процесса формирования биметаллической заготовки

Варьируемые параметры процесса: степень перегрева расплава чугуна в интервале температур 1275–1450°C, схема процесса (корундовая или медная донная пробка) и коэффициент теплоотдачи  $\alpha_K$  на внутренней стенке кристаллизатора, зависящий от расхода воды на охлаждение – в данном случае приняты три значения  $\alpha_K = 2500$  Вт/м<sup>2</sup>·К,  $\alpha_K = 5000$  Вт/м<sup>2</sup>·К и  $\alpha_K = 7500$  Вт/м<sup>2</sup>·К.

При решении задачи на внутренней поверхности кристаллизатора задается зависимость плотности теплового потока вследствие теплопроводности со стороны тела от температур поверхности тела и окружающей среды (граничные условия III рода). Температура внутренней поверхности кристаллизатора принимается равной

$T_{П0} = 30^\circ\text{C}$ , температура окружающей среды (охлаждающей воды) –  $T^* = 30^\circ\text{C}$ . Теплообменом между расплавленным металлом и стенкой агрегата при решении этой задачи пренебрегаем.

Начальная температура расплава  $T_{М0}$  считается равномерно распределенной по всему объему расплава и принимается равной 1450°C. Начальная температура кристаллизатора также принимается равномерно распределенной –  $T_{К0} = T_{П0} = 30^\circ\text{C}$ .

Температура затвердевания для модифицированного чугуна, при коэффициенте затвердевания [2]  $k_t = 0,3$ ;  $T_3 = 1275^\circ\text{C}$ . В качестве исходных данных в программу для вычисления тепловых характеристик описанного выше процесса затвердевания вводится зависимость коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости, плотности и энтальпии от температуры, как для кристаллизатора, так и для намораживающегося чугуна.

Основные параметры расчета:

- тип анализа – нестационарный анализ;
- модель осесимметричная;
- количество элементов – 3577, количество узлов – 3718;
- используемый конечный элемент четырехугольный.

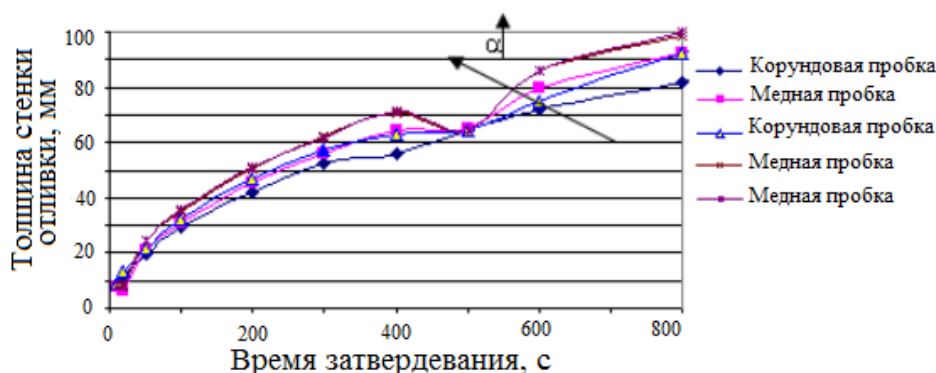


Рис. 2. Кинетические кривые затвердевания

После обработки результатов решения были получены данные (рис.2), отображающие характер изменения толщины намораживающейся стенки от времени погружения кристаллизатора в расплав чугуна в зависимости от условий охлаждения кристаллизатора. В частности, формирование заготовки с отношением  $d/D = 0,5$  в случае  $\alpha_K = 2500$  Вт/м<sup>2</sup>·К составляет 10 минут. Следовательно, за время действия модификаторов (около 20 минут) можно получить две заготовки с указанным отношением.

Также была определена температура по сечению кристаллизатора в различных точках. Определено, что во время формирования полый

заготовки расплавление стенки кристаллизатора (при перегреве расплава чугуна до температуры 1450°C) не произойдет даже в начальный момент погружения кристаллизатора в расплав чугуна в случае использования керамической донной пробки в самой отдаленной точке кристаллизатора от охлаждаемой поверхности, когда граничные условия представляют собой самый худший вариант. Следовательно, процесс намораживания будет протекать стабильно.

### Исследование технологических особенностей процесса получения деформированной заготовки

При деформации полых заготовок из ЧШГ необходимо сохранение глобулярной формы кристаллов графита, а структура матрицы чугуна должна быть феррит-перлитной [1]. Поскольку именно глобулярная форма кристаллов графита обеспечивает требуемые эксплуатационные характеристики чугуна. Считается, что отклонение в 25 % от сферической формы кристалла графита является допустимым, чтобы считать кристалл глобулярным. Такое изменение структуры металла при единичном акте интенсивной пластической деформации обычными способами ОМД всегда носит направленный характер. Поэтому в целях сохранения равноосной структуры металла необходимо использовать специальные способы ОМД. Под специальными схемами ОМД здесь понимается такие сочетания технологических операций, в результате которых происходит значительная проработка структуры металла без образования текстуры деформации. Для формирования требуемой структуры металла необходимо сочетание схем деформации, характеризующееся (преимущественно) разнонаправленными напряжениями и деформациями на каждом этапе деформирования, но которые взаимно уравнивают друг друга в конечном формоизменении. Разнонаправленность схем деформации (при использовании подпора, активных сил трения) обеспечивает значительную проработку всей структуры обрабатываемой заготовки без разрушения. К таким методам можно отнести угловое прессование, совмещение прессования иковки (штамповки), прокатки иковки (штамповки), радиальное обжатие без вытяжки.

В связи с вышеизложенным, интересно рассмотреть деформированное состояние в простых процессах ОМД: протяжка заготовок через коническую матрицу (вытяжка с утонением стенки), осадка и закрытая прошивка полых заготовок в контейнере. Данные процессы характеризуются благоприятной схемой напряженно-деформированного состояния. Недостаток всех приведенных в литературе данных относительно этих процессов [3, 4] сводится к определению только энергосиловых условий деформации. Деформированное состояние фигурирует только в виде функций, определяющих течение металла при выбранной схеме очага пластической деформации [5]. Данные функции используются для записи физических уравнений связи. Актуальность проведения теоретического анализа выбранных процессов с точки зрения сохранения равноосной структуры зерна и накопления степени деформации сдвига –  $\Lambda$  обусловлена рассмотрением возможного сочетания указанных схем для деформации малопластичных и легко текстурируемых металлов.

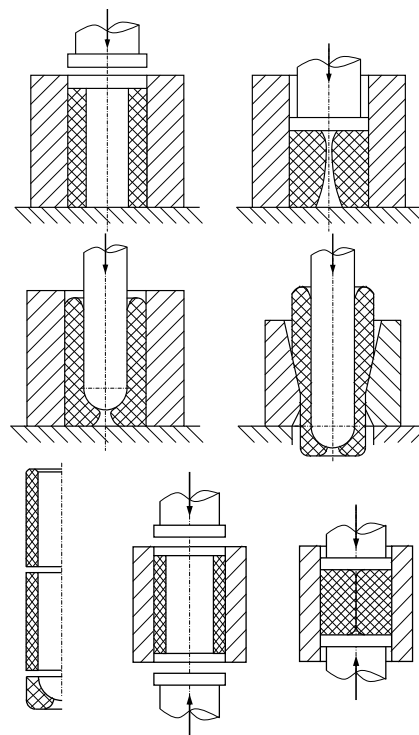


Рис. 3. Схемы процессов ОМД для производства прессового инструмента для прессования алюминиевых сплавов

Для качественного анализа предложенной совокупности схем деформации в рамках настоящего исследования решены следующие задачи:

- определение распределения  $\Lambda$  по объему заготовки в процессах протяжки, осадки и прошивки;
- нахождение схем, при которых степень накопленной деформации будет одинакова (с приемлемой для инженерных расчетов точностью) на каждом этапе пластической обработки;
- определение направления главных деформаций в каждом процессе, с точки зрения сохранения формы зерна.

Анализ накопления  $\Lambda$  проведен методом конечных элементов. Для нахождения поля скоростей и последующего вычисления компонент тензора напряжений, в каждый момент времени решается краевая задача расчета полей скоростей и напряжений для несжимаемой вязко-жестко-пластической среды.

Общими данными при постановке задач являлись: осесимметричная модель процесса, материал заготовки Ст3 с законом упрочнения Хензеля в диапазоне температур 800...1300°C, температура нагрева заготовки 950°C, инструмента – 700°C, скорость деформации 25 мм/мин (гидравлический пресс). Значения коэффициентов трения на контактных поверхностях приняты либо на основе литературных данных, либо после проведения экспериментальных исследований, которые в данной работе не рассматриваются.

При моделировании протяжки заготовок через коническую матрицу (угол наклона

образующей матрицы к ее оси принят  $15^\circ$  [6]) в качестве варьируемого параметра принят коэффициент вытяжки  $\lambda=1,10, 1,15, 1,20, 1,25, 1,30$ , изменение которого осуществлялось увеличением наружного диаметра протянутой заготовки при постоянном ее внутреннем диаметре. На контактной поверхности принят коэффициент трения (по Зибелю) 0,1, на границе оправки и заготовки 0,5.

После проведения решения, представления результатов в виде линий уровня при отражении степени деформации сдвига  $\Lambda$ , накопленной к концу процесса деформации [7], определили, что закон изменения  $\Lambda$  от вытяжки можно представить в виде  $\Lambda = 0,4461\lambda^{3,949}$ .

При моделировании процесса осадки заготовок в контейнере в качестве варьируемых параметров приняты: отношение высоты заготовки к наружному диаметру  $\tilde{h} = H/D = 1 \dots 4$  и отношение внутреннего и наружного диаметров заготовки  $\tilde{d}_i = d/D$ , где  $i=0,666, 0,750, 0,800, 0,833$ . Коэффициент трения на торцевых контактных поверхностях пуансонов 0,7, на границе с втулкой контейнера 0,3. Также учитывалась существенная неравномерность распределения  $\Lambda$  по объему заготовки, особенно в прилегающих к деформирующему инструменту зонах.

После анализа всех результатов решений выяснили, что наиболее приемлемым процессом, с точки зрения совмещения двух схем деформаций, является осадка при  $\tilde{h}=1$ . Степенные зависимости, характеризующие изменение  $\Lambda$  при данных условиях выглядят следующим образом

$\Lambda = 0,0136\epsilon^{1,206}$  - для случая  $d/D=0,833$ ;

$\Lambda = 0,0259\epsilon^{1,0418}$  - для случая  $d/D=0,800$ ;

$\Lambda = 0,0249\epsilon^{1,0622}$  - для случая  $d/D=0,750$ ;

$\Lambda = 0,0098\epsilon^{1,3373}$  - для случая  $d/D=0,666$ .

При моделировании процесса прошивки заготовок в контейнере в качестве варьируемых параметров приняты геометрические размеры заготовки  $\tilde{h}$  и  $\tilde{d}_i$ , как в задаче по осадке. Коэффициент трения на контактной поверхности со сферическим пуансоном и втулкой контейнера 0,3, на нижнем основании контейнера 0,7. Для характеристики исходного состояния прошиваемой заготовки принимались конечное деформированное состояние и геометрические соотношения заготовки из соответствующей задачи по осадке в контейнере.

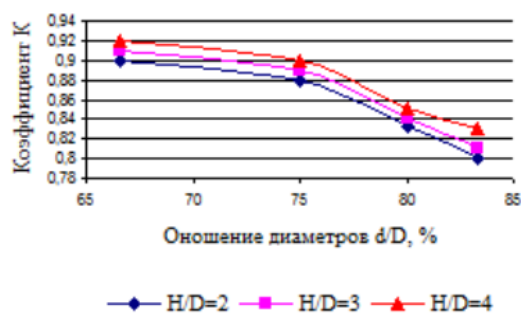


Рис. 4. Зависимость коэффициента «k» от начальных размеров заготовки при осадке

При обработке результатов решения определили, что проработка структуры металла при прошивке заготовок при равенстве стенок осаживаемой втулки и получаемой трубной заготовки выше. Разница составляет до 40% (относительная величина). Разница возрастает, при увеличении отношения  $\tilde{d}_i$ . После решения ряда задач, направленных на определение диаметра прошивающего пуансона при котором наблюдалось бы равенство значений  $\Lambda$  по объему деформированных заготовок в процессах их осадки и прошивки в контейнере, определили параметр  $k = h_{oc}/h_{пр}$ . Данный параметр характеризует увеличение стенки получаемой трубной заготовки по сравнению с начальной толщиной стенки осаживаемой втулки (рис. 4). Здесь  $h_{пр}$  – толщина стенки получаемой трубной заготовки,  $h_{oc}$  – толщина стенки осаживаемой втулки.

В качестве важных показателей деформированного состояния, достаточно легко определяемых методом координатных сеток, рассматриваются величины главных деформаций и угловые положения главных направлений. При моделировании указанных процессов легко задается и отрисовывается исходная и деформированная координатная сетка. Таким образом, определяя главные деформации по

формуле [7]  $\epsilon_{ii} = \ln \frac{d_i}{d_0}$  (здесь  $d_i$ ,  $d_0$  –

соответственно конечная и начальная длина диагонали вписанной в ячейку окружности) и угол поворота каждой ячейки относительно соответствующей оси, было проведено сравнение данных схем деформации. В качестве оценки однородности деформаций при совмещении процессов приняты соответствующие относительные показатели для главных деформаций

$$\delta = \frac{(\epsilon_{ii}^{oc} - \epsilon_{ii}^{пр})}{\epsilon_{ii}^{oc}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

для угла наклона ячейки

$$\gamma = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{90} \cdot 100\% . \quad (2)$$

где

$\varphi$  – символы, характеризующие направление измерения главных деформаций;

$\varphi$  – угол наклона главных осей деформации к оси пуансона.

Если деформации на двух последовательных этапах обжатия компенсируют друг друга, а главные направления деформаций этапов деформирования ортогональны, по показатели  $\delta$  и  $\gamma$  равны нулю. Отклонение их от нуля характеризует несовершенство совмещения деформаций на этапах обработки.

При сравнении результатов протяжки и осадки (при условии совпадения средней по объему  $\Lambda$ ) было установлено, что главные деформации растяжения при осадке (в осевой плоскости) значительно превышают по абсолютной величине деформации при протяжке. Поэтому при смене знака деформации за счет изменения направления преимущественного течения металла (переворот заготовки), разница в главных деформациях достигает  $\delta=50\ldots 80\%$ . Главные деформации в ортогональном направлении практически компенсируют друг друга ( $\delta=15\ldots 20\%$ ); показатель  $\gamma$  колеблется в интервале  $0\ldots 15\%$ . Здесь левая граница интервала соответствует зоне, примыкающей к контейнеру, правая – к зоне, примыкающей к свободной внутренней поверхности деформированной заготовки после осадки.

При сравнении результатов осадки и прошивки (при условии равенства средней по объему  $\Lambda$ ) по толщине стенки было выделено четыре зоны, начиная от внутренней поверхности. В первой зоне, где преобладают деформации растяжения и сдвига после прошивки, координатная сетка сильно искажена вследствие действия сил трения движения прошивающего пуансона (приконтактный слой составляет до 20% от толщины стенки). Во второй и третьей зонах наблюдается относительно равноосная структура металла (занимают по 25% от толщины стенки), показатели  $\delta$  в обоих направлениях не превышают 20..23%, показатель  $\gamma$  колеблется в интервале  $0\ldots 10\%$ . В четвертой зоне (зона контакта со стенкой контейнера, занимающая до 30% от толщины стенки) сохраняется наследственная структура осадки, показатели  $\delta$  в обоих главных направлениях составляют 33...40%, показатель  $\gamma$  колеблется в интервале 12...14%.

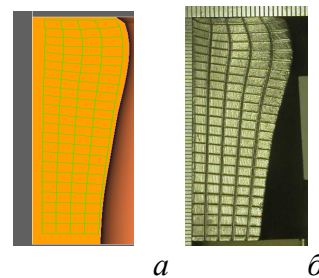


Рис. 5. Координатные сетки а- решение методом конечных элементов; б- эксперимент

Для определения адекватности полученных результатов теоретических решений в лаборатории кафедры ОМД были проведены опыты по осадке полых заготовок из свинца (рис. 5). Для получения полых заготовок свинцовые слитки отлитые в металлическую форму были отпрессованы на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 6 МН из контейнера  $\varnothing 75$  мм на диаметр 50 мм, при этом вытяжка составила 2,25. Цилиндрические заготовки длиной  $\approx 100$  мм, отрезанные от прессованного прутка, осаживались в контейнере с логарифмической высотной деформацией 0,31 и сострагивались затем до диаметральной плоскости. Каждая осаживаемая заготовка (высотой 73 мм) состояла из двух одинаковых половин, на одной из которых штангенрейсмасом наносилась координатная ортогональная сетка с шагом  $3 \pm 0,05$  мм. Перед деформированием в образцах, спаянных сплавом Вуда, растачивались отверстия с заданным относительным диаметром полости  $\tilde{d}$  (0,5 и 0,75).

Высотный параметр  $\tilde{h}$ , определяющий устойчивость процесса осадки, равный отношению высоты заготовки к наружному диаметру в каждом случае одинаков и равен 1,258.

Осадка осуществлялась на УИМ-30 в специальной установке, позволяющей весь процесс деформации разбить на несколько этапов и после каждого этапа проводить измерения координатной сетки. Заготовки осаживались при комнатной температуре без смазки контактных поверхностей пуансонов и втулки контейнера с относительным обжатием по высоте 20% и 45,5% для случаев  $\tilde{d}=0,5$  и  $\tilde{d}=0,75$  соответственно.

При нахождении среднего по объему заготовки значения  $\Lambda$  была использована методика определения компонент тензора деформации для осесимметричной задачи [8]. После сравнения результатов на каждом этапе деформации получили, что разница в случае  $\tilde{d}=0,75$  составляет не более 4,2%, в случае  $\tilde{d}=0,5$  – не более 11,5%. Картины искажения координатных сеток, полученных в эксперименте и при теоретическом решении, приведены на рис.4.

### Выводы

1. Определены кинетические кривые затвердевания в процессе литья намораживанием на внешней поверхности охлаждаемой трубы-кристаллизатора для различных технологических параметров литья модифицированного чугуна. Определены температурные интервалы перегрева расплава чугуна (до 1450<sup>0</sup>С). Определены оптимальные скорости охлаждения отливок из ЧШГ;

2. Определены основные зависимости  $\Lambda = f(\lambda)$ ,  $\Lambda = f(\varepsilon)$  характеризующие деформированное состояние полой заготовки в рассматриваемых процессах ОМД;

3. При моделировании процесса закрытой прошивки в контейнере фасонным пуансоном предварительно осаженной заготовки выявлено, что при равенстве толщины стенок начальной осаживаемой заготовки и получаемой после прошивки трубы, накопленная деформация по стенке больше в случае прошивки. Подобраны зависимости (параметр « $k$ »), которые позволяют получить одинаковую проработку структуры по толщине стенки;

4. Выявлено, что при совмещении указанных процессов можно сформировать относительно равноосную структуру зерен металла. Даже в самом плохом случае искажение координатной сетки меньше, чем при деформации обычными способами ОМД.

### Библиографический список

1.Чугун: Справочник /Под ред. Шермана А.Д., Жукова А.А. М.:Металлургия, 1991. 576 с.

2.Тепловые процессы при непрерывном литье стали. Самойлович Ю.А., Крулевецкий С.А., Горяинов В.А. и др., М.: Металлургия, 1982. 152 с.

3.Теория обработки металлов давлением. И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго и др., под ред. И.Я. Тарновского, М.:Металлургиздат, 1963, 672с.

4.Овчинников А.Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. М.: Машиностроение, 1983. 200 с.

5.Логинов Ю.Н., Буркин С.П. Вариационное решение задачи осадки в контейнере полой заготовки из текстуруемого материала. Известия ВУЗов. Цветная металлургия, 1998, №1, с.31-36.

6.Исследование контактных напряжений при вытяжке с утонением / С.П. Буркин, И.Я. Тарновский, А.Н. Леванов и др. //Кузнечно – штамповочное производство. 1970. №7. С.18-20.

7.Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2001. 836 с.

8.Решение задач на микроЭВМ. Паршаков С.И., Колмогоров В.Л., Буркин С.П. и др. М.: Металлургия, 1993. 320с.