Эффект повышения стойкости обеспечивается нанесением ФАБО на наиболее нагруженные части штампа (вытяжное ребро матрицы) с совместным применением отечественной металлоплакирующей присадки «Валена».

Необходимо дальнейшее исследование представленной технологии с целью определения оптимальных условий нанесения покрытия ФАБО и оптимальной концентрации присадки в смазочной среде, применительно к различным штампуемым материалам.

Литература

1. Повышение стойкости штампов/ Вайнтрауб Д.А. – Лениздат: Ленинград. 1958.
2. Исследования ГОСНИТИ, ВНИИТиНи ООО «РИП» в области нетрадиционной триботехники/ Дунаев А.В., Остриков В.В., Пустовой И.Ф. Ремонт, восстановление, модернизация. – 2013. – № 3.
3. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) деталей/ Карпенков В.Ф., Стрельцов В.В., Приходько И.Л., Попов В.Н., Некрасов С.С. – Пущино : ОНТИ ПНЦ РАН, 1996 – 108 с.
4. Технология листовой штамповки. Технологическое обеспечение точности и стойкости/ В.Г. Ковалёв, С.В. Ковалёв. – М. : КНОРУС, 2010 – 224 с.
5. Основы расчётов на трение и износ/ Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. – М.: Машиностроение, 1977 – 436 с.
6. Теория пластической деформации и обработка металлов давлением/ Мастеров В.А., Берковский В.С. – М. Металлургия, 1989.
7. Холодная листовая штамповка днищ/ Мельников Э.Л. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
8. Методика проектирования машин с заданным ресурсом работы/ Мельников Э.Л., Серёжкин М.А. Ремонт, восстановление, модернизация. – 2009. – № 12.
9. Параметрическая надёжность машин/ Проников А.С. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002 – 560с.
10. Повышение стойкости штамповой оснастки трибологическими методами/ Ремонт, восстановление, модернизация/ Сережкин М.А. Мельников Э.Л. 2013. – № 12.
11. Формирование катализатором «*Evo®lution*» в зонах трения алмазоподобных углеродных пленок/ Сокол С.А. Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. – № 3.
12. Расчёт соединений /Хохлов В.М., Хохлова С.В., Петраков Д.И. – Брянск, ООО «ВИМАХО», 2007 – 208 с.

Определение минимально допустимого радиуса закругления в штампе для изотермического прямого осесимметричного выдавливания алюминиевого сплава АД35

Воронков В.И.

Университет машиностроения

8(926)-135-63-40, v-i-w@bk.ru

Аннотация. В статье описывается методика, а также приведены графики, для определения оптимального радиуса закругления в инструменте для изотермической штамповки при прямом выдавливании в осесимметричной матрице. Метод определения оптимального радиуса закругления основывается на решении задачи минимизации полной мощности пластической деформации при течении металла в осесимметричной матрице без закругления, т.е. при свободном течении материала на переходе. Теоретическое решение задачи нахождения оптимального радиуса закругления проверено экспериментально.

Ключевые слова: *оптимальный радиус закругления, метод баланса мощности, прямое выдавливание, изотермическая штамповка, сплав АД35*

Изотермическая штамповка – процесс горячего деформирования заготовок деталей в инструменте, температура которого находится в пределах рекомендуемого температурного интервала горячего деформирования штампуемого материала, при относительно невысоких скоростях деформирования, как правило, не превышающих 5 мм/с. Штамповка с малыми скоростями при постоянной оптимальной температуре обеспечивает высокие пластические свойства обрабатываемых материалов, однородность температурного поля, равномерность деформаций, снижение контактного трения, силы штамповки и нагрузок на инструмент, повышение пластичности за счёт "залечивания" микротрещин. Указанные особенности изотермической штамповки позволяют получать детали сложной формы с тонкими полотнами и ребрами, выступами и полостями, резкими перепадами сечений, вертикальными стенками и другими элементами, получение которых при обычной штамповке невозможно или затруднено. Кроме того, изотермическая штамповка позволяет снизить напуски, что существенно снижает объёмы последующей обработки резанием [1, 2]. Несмотря на вышеприведенные преимущества изотермической штамповки, данная технология пока ещё не нашла широкого применения (в основном из-за тяжёлых условий работы изотермических штампов), и опыт оптимального проектирования чертежа штамповки ещё не накоплен; так, например, в литературе нет чётких указаний по выбору радиусов закруглений на переходах в штампе.

Для определения радиуса закругления на переходе в штампе будем считать, что оптимальный (или минимально допустимый) радиус будет соответствовать естественному радиусу закругления, образующемуся при перетекании металла в полость без радиуса закругления. Рассмотрим схему прямого осесимметричного выдавливания в матрице без скругления на ребре, через которое перетекает материал (рисунок 1). При перетекании металла в полость матрицы образуется естественный радиус закругления.

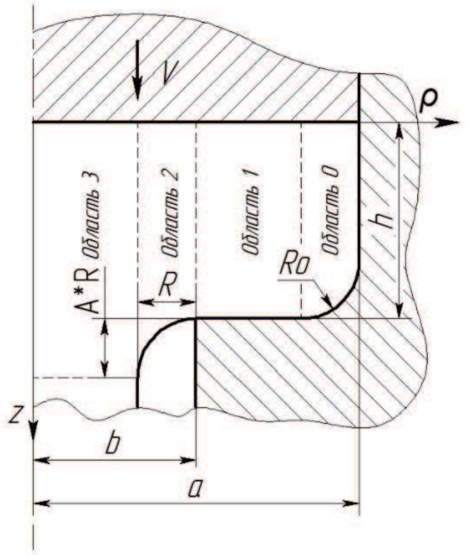

Рисунок 1. Схема задачи прямого осесимметричного выдавливания

Постановка задачи

Решить данную задачу методом конечных элементов, с применением специализированного коммерческого программного обеспечения, достаточно проблематично, т.к. в месте перетекания материала через острую кромку, или кромку с очень малым радиусом скругления, узлы сетки конечных элементов выходят за границы поверхности инструмента, что вызывает вырождение элементов, и делает решение некорректным. Для решения задачи будем использовать метод баланса мощности. Определим радиус естественного течения металла исходя из принципа минимума мощности при свободном перетекании материала: $dN/dR=0$; где N - полная мощность пластической деформации, R - радиус естественного течения материала.

Между вертикальной и горизонтальной поверхностями матрицы, образующими контейнер, предусмотрен радиус закругления R_0. Пуансон движется вниз, в направлении оси z, со скоростью V. Очаг деформации разделён на четыре области. Задача решается методом баланса мощности со следующими допущениями: материал несжимаем, однороден, изотропен, жесткопластичен и идеально пластичен (его переход в пластическое состояние определяется только величиной интенсивности напряжений σ_s). Температурные напряжения, силы инерции, другие массовые силы, упругие деформации инструмента пренебрежимо малы и не учитываются в расчетах. В деформируемом металле допустимы разрывы скоростей, при этом сохраняется непрерывность нормальных составляющих скорости. Касательные напряжения, возникающие на разрывах скоростей, максимальны:

$$\tau_{13} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}; \tag{1}$$

где: σ_s - напряжение течения.

Определим поле скоростей для каждой области.

Область 0.

Примем, что в нулевой области компонента скорости по оси z $V_{z0} = V + k_0 z \cdot (k_5 + \rho)$, тогда компонента скорости деформации $\dot{\varepsilon}_{z0} = k_0 \cdot (k_5 + \rho)$. Из условия постоянства объёма и учитывая, что $V_{\rho 0}(a) = 0$, находим компоненту скорости по оси ρ $V_{\rho 0}$:

$$k_0(k_5 + \rho) + V_{\rho 2}/\rho + \partial V_{\rho 2}/\partial\rho = 0. \tag{2}$$

Зная $V_{\rho 0}$, можно определить компоненты скорости деформации $\dot{\varepsilon}_{\rho 0} = -(k_0 \cdot (2a^3 + 3k_5 a^2 + 4\rho^3 + 3k_5\rho^2))/(6\rho^2)$ и $\dot{\varepsilon}_{\theta 0} = (a^2 k_0 \cdot (2a + 3k_5))/(6\rho^2) - (k_0 \cdot (3k_5 + 2\rho))/6$.

Скорость сдвиговой деформации $\dot{\gamma}_{z\rho 0} = k_0 z$.

Коэффициент k_0 определим из условия, что при $\rho = a - R_0$ и $z = h$ $V_{z0} = 0$.

Коэффициент k_5 определим исходя из того, что при $\rho = a - R_0/8$ и $z = f_0(a - R_0/8)$ отношение компонент скорости $V_{z0}/V_{\rho 0} = tg(\beta)$, где:

$$f_0(\rho) = h - R_0 + \sqrt{R_0^{\,2} - (\rho - a + R_0)^2}, \tag{3}$$

уравнение, определяющее форму закругления по радиусу R_0, а

$$\beta = \pi - \arcsin((R_0 - R_0/8)/R_0) \tag{4}$$

угол наклона касательной к функции (3) в точке с координатами $\rho = a - R_0/8$ и $z = f_0(a - R_0/8)$.

Область 1.

Т.к. $V_{z1}(0) = V$, примем, что компонента скорости по оси z в первой области $V_{z1} = (V \cdot (h - z))/h$, а компонента скорости деформации соответственно $\dot{\varepsilon}_{z1} = -V/h$. Тогда из условия постоянства объёма находим компоненту скорости по оси ρ в первой области $V_{\rho 1}$, учитывая, что $V_{\rho 1}(a - R_0) = V_{\rho 0}(a - R_0)$:

$$\dot{\varepsilon}_{z1} + V_{\rho 1}/\rho + \partial V_{\rho 1}/\partial\rho = 0. \tag{5}$$

Из уравнения (5) $V_{\rho 1} = -(V \cdot (a^2 - \rho^2))/(2h\rho)$, тогда компоненты скорости деформации $\dot{\varepsilon}_{\rho 1} = (V \cdot (a^2 + \rho^2))/(2h\rho^2)$ и $\dot{\varepsilon}_{\theta 1} = -(V \cdot (a^2 - \rho^2))/(2h\rho^2)$.

Область 3.

Учитывая, что при $\rho = 0$ компонента скорости по оси ρ в третьей области $V_{\rho 3} = 0$, примем: $V_{\rho 3} = k_3\rho$; тогда компоненты скорости деформации $\dot{\varepsilon}_{\rho 3} = k_3$ и $\dot{\varepsilon}_{\theta 3} = k_3$. Из условия постоянства объёма, учитывая, что $V_{z3}(0) = V$:

$$\partial V_{z3}/\partial z + 2k_3 = 0. \tag{6}$$

Находим компоненту скорости по оси z: $V_{z3} = V - 2k_3 z$ и компоненту скорости деформации $\dot{\varepsilon}_{z3} = -2k_3$.

Коэффициент k_3 найдём из условия постоянства потока:

$$V_{z3}\pi \cdot (b - R)^2 = V\pi a^2. \tag{7}$$

Из выражения (7) $k_3 = -((Va^2)/2 - (V \cdot (R-b)^2)/2)/((R-b)^2 \cdot (h + A \cdot R))$.

Область 2.

Примем, что во второй области компонента скорости по оси z $V_{z2} = V + k_2 z \cdot (k_1 - \rho)$, тогда $\dot{\varepsilon}_{z2} = k_2 \cdot (k_1 - \rho)$. Из условия постоянства объёма и равенства нормальных к поверхности разрыва компонент скорости, $V_{\rho 2}(b) = V_{\rho 1}(b)$, находим $V_{\rho 2}$:

$$k_2(k_1 - \rho) + V_{\rho 2}/\rho + \partial V_{\rho 2}/\partial \rho = 0. \tag{8}$$

Зная компоненту скорости $V_{\rho 2}$, можно определить компоненты скорости деформации $\dot{\varepsilon}_{\rho 2}$ и $\dot{\varepsilon}_{\theta 2}$.

Скорость сдвиговой деформации $\dot{\gamma}_{z\rho 2} = -k_2 z$.

На границе свободного течения отношение $V_{z2}/V_{\rho 2} = tg(\alpha)$, где α - угол наклона касательной к функции, задающий форму границы свободного течения материала. Тогда

$$\frac{V_{z2}}{V_{\rho 2}} = \frac{df(\rho)}{d\rho}; \tag{9}$$

где $f(\rho)$ - функция определяющая форму границы течения материала на свободной поверхности.

Решая дифференциальное уравнение (9), определяем функцию $f(\rho)$.

Коэффициент k_1 найдём из условия, что $f(b-R) = h + A \cdot R$, а из равенства нормальных к линии разрыва компонент скорости при $\rho = b - R$, когда $V_{\rho 2}(b-R) = V_{\rho 3}(b-R)$, найдём коэффициент k_2.

Выражение баланса мощности для рассматриваемой задачи будет иметь вид:

$$\begin{aligned} N = {} & 2\pi\sigma_{i0}\int_{a-R_0}^{a} d\rho \int_0^{f_0(\rho)} \dot{\varepsilon}_{i0}\rho dz + 2\pi\int_0^h dz \int_b^a \dot{\varepsilon}_{i1}\sigma_{i1}\rho d\rho + \\ & + 2\pi\sigma_{i2}\int_{b-R}^{b} d\rho \int_0^{f(\rho)} \dot{\varepsilon}_{i2}\rho dz + 2\pi\sigma_{i3}\int_0^{h+AR} dz \int_0^{b-R} \dot{\varepsilon}_{i3}\rho d\rho + \\ & + 2\pi(a-R_0)\int_0^h |V_{z0} - V_{z1}| \frac{\sigma_{i01}}{\sqrt{3}} dz + 2\pi b\int_0^h |V_{z1} - V_{z2}| \frac{\sigma_{i12}}{\sqrt{3}} dz + 2\pi(b-R)\int_0^{h+AR} |V_{z2} - V_{z3}| \frac{\sigma_{i23}}{\sqrt{3}} dz + \\ & + \frac{2\pi m}{\sqrt{3}}\Big(a\int_0^{h-R_0} |V_{z0}|\sigma_{i0} dz + \int_{a-R_0}^{a} |V_{\rho 0}|\sigma_{i0}\rho d\rho + \int_{h-R_0}^{h} \sqrt{V_{z0}^2 + V_{\rho 0}^2} f_{0z}\sqrt{1 + (f_{0z}')^2} dz + \\ & + 2\int_b^{a-R_0} |V_{\rho 1}|\sigma_{i1}\rho d\rho + \int_{b-R}^{b} |V_{\rho 2}|\sigma_{i2}\rho d\rho + \int_0^{b-R} |V_{\rho 3}|\sigma_{i3}\rho d\rho\Big), \end{aligned} \tag{10}$$

где: $\dot{\varepsilon}_{i0}$, $\dot{\varepsilon}_{i1}$, $\dot{\varepsilon}_{i2}$ и $\dot{\varepsilon}_{i3}$ - интенсивности скоростей деформации в нулевой, первой, второй и третьей области соответственно; σ_{i0}, σ_{i1}, σ_{i2}, σ_{i3} - напряжение текучести материала в каждой области; ε_0 - начальное значение накопленной деформации; σ_{i01}, σ_{i12}, σ_{i23} - напряжение текучести материала на линии разрыва скоростей; m - фактор трения; f_{0z} - функция, определяющая форму закругления по радиусу R_0 зависящая от

$$f_{0z}(z) = a - R_0 + \sqrt{2hz + 2R_0 h - h^2 - z^2 - 2R_0 z}. \tag{11}$$

Учитывая, что в нулевой области выполняется такие граничные условия как $V_{\rho 0}(a) = 0$, $V_{z0}/V_{\rho 0} = tg(\beta)$ (см. выражения 3 и 4) и $V_{z0}(h, a - R_0) = 0$, можно считать, что вектор скорости перемещения материала по поверхности закругления R_0 определяется как сумма компонент скорости $V_{z0}(z, f_{0z})$ и $V_{\rho 0}(f_{0z})$: $\sqrt{V_{z0}^2 + V_{\rho 0}^2}$.

Значения σ_{i0}, σ_{i1}, σ_{i2}, σ_{i3}, σ_{i01}, σ_{i12}, σ_{i23} вычисляются по модели сопротивления деформации [5, 6], например, модели Хензеля-Шпиттеля с девятью неизвестными коэффициентами:

$$\sigma_i = a_1 \exp(a_2 T) T^{a_3} \varepsilon_i^{a_4} \exp(a_5/\varepsilon_i)(1 + \varepsilon_i)^{a_6 T} \exp(a_7 \varepsilon_i) \dot{\varepsilon}_i^{a_8} \dot{\varepsilon}_i^{a_9 T}. \tag{12}$$

При расчёте напряжения текучести по данной модели принимали, что накопленная деформация изменяется только на поверхностях разрыва скоростей, которую можно определять по выражению для стационарных поверхностей разрыва [1, 2]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta|V|}{\sqrt{3}|V_n|}; \quad (13)$$

где: $\Delta|V|$ - разность между компонентами скорости касательных к линии разрыва; V_n - компонента скорости, нормальная к линии разрыва.

$$\varepsilon_{01} = \frac{|V_{z0}(z) - V_{z1}(z, a - R_0)|}{\sqrt{3}|V_{\rho 0}(a - R_0)|} + \varepsilon_0, \quad (14)$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{|V_{z1}(z) - V_{z2}(z, b)|}{\sqrt{3}|V_{\rho 1}(b)|} + \varepsilon_0 + \varepsilon_{01}, \quad (15)$$

$$\varepsilon_{23} = \frac{|V_{z2}(z, b - R) - V_{z3}(z)|}{\sqrt{3}|V_{\rho 3}(b - R)|} + \varepsilon_0 + \varepsilon_{01} + \varepsilon_{12}.. \quad (16)$$

В выражении (10) значения σ_{i0}, σ_{i2} и σ_{i3} вынесены из под знака интеграла, что существенно упрощает решение. Значения σ_{i0}, σ_{i2} и σ_{i3} определяли для интенсивности скорости деформации, найденной в точке, соответствующей центру области, и для значения накопленной деформации ε_0 при расчёте σ_{i0}, а также ε_{12} и ε_{23} при расчёте σ_{i2} и σ_{i3}, найденных при $z = h/2$ и $z = (h + A \cdot R)/2$ соответственно.

Т.к. $\acute{\varepsilon}_{i2}$, $\acute{\varepsilon}_{i3}$, V_{x2}, V_{x3}, V_{z2}, V_{z3}, σ_{i2}, σ_{i3}, σ_{i12}, σ_{i23} зависят от R, то мощность N также зависит от R. Минимизируя выражение 10 по R, можно найти отход материала от стенки пуансона, который, в свою очередь, будет равен оптимальному радиусу закругления в штампе, или, иными словами, минимальным радиусом, при котором материал не будет отходить от стенки штампа при обратном выдавливании.

Проведение эксперимента

Полученное теоретическое решение задачи нахождения оптимального (естественного) радиуса закругления проверено экспериментально.

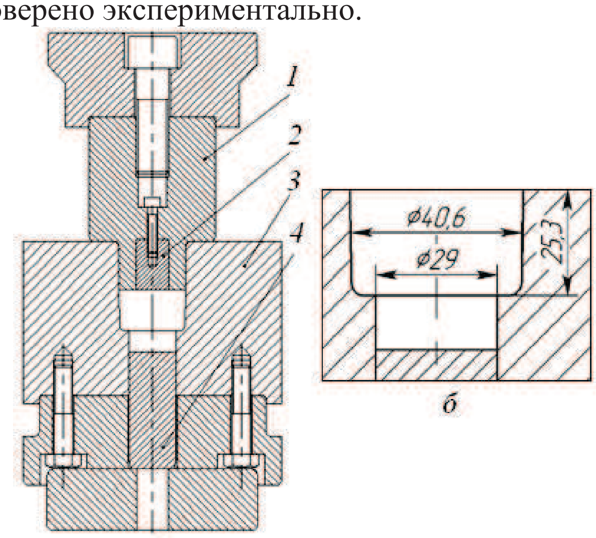

Рисунок 2. Оснастка для проведения испытаний: *а* – оснастка; *б* - размеры формообразующих полостей; *1* - пуансон; *2* - матрица; *3* - заглушка; *4* – выталкиватель

Для этого была изготовлена оснастка для деформирования в изотермических условиях по схеме прямого осесимметричного выдавливания. В оснастке отношение меньшего радиуса канала к большему a/b = 1,4, отношение h/b = 1,74 и отношение $(a - b)/R_0$ = 1,.93 (рисунок 2). Исследования проводили на гидравлическом прессе силой 2500 кН в изотермических условиях при температуре 450ºС. Скорость деформирования составляла 2 мм/с. Оснастку нагревали индуктором. Температуру рабочего инструмента контролировали термопарой. Заготовки из алюминиевого сплава АД35 диаметром 40 мм и высотой 30,5 мм нагревали в печи. При достижении температуры 450°С заготовки на специальной плите доставали из печи, после чего наносили на них смазку АСВ-К. После нанесения смазки заготовки помещали обратно в печь, и вновь нагревали до температуры 450°С. На инструмент перед штамповкой также наносили смазку.

Состав смазки АСВ-К: коллоидный графит (30%), соли лигносульфоновых кислот, соль кремниевой кислоты, карбонат, фосфаты, оксиды, алкилфенол. Дисперсность графита до 5 мкм (60%). При изотермическом деформировании смазка обеспечивает фактор трения m = 0,3 [3].

При проведении эксперимента получили образцы (рисунок 3, *а*). Геометрия естественного закругления материала, образующаяся при свободном течении металла, измерялась в двух направлениях (рис. 3б): в горизонтальном (отход материала от стенки канала матрицы) и вертикальном (расстояние до перехода закругления в вертикальную цилиндрическую поверхность или в поверхность конуса с углом наклона образующей близким к 90º). Среднее значение отхода материала от стенки канала матрицы составило 0,96 мм (R/b = 0,066 при a/b = 1,4, h/b = 1,74 и $(a - b)/R_0$ = 1,93). Среднее отношение замера закругления по вертикали к горизонтальному размеру составило 1,28 (≈1,3).

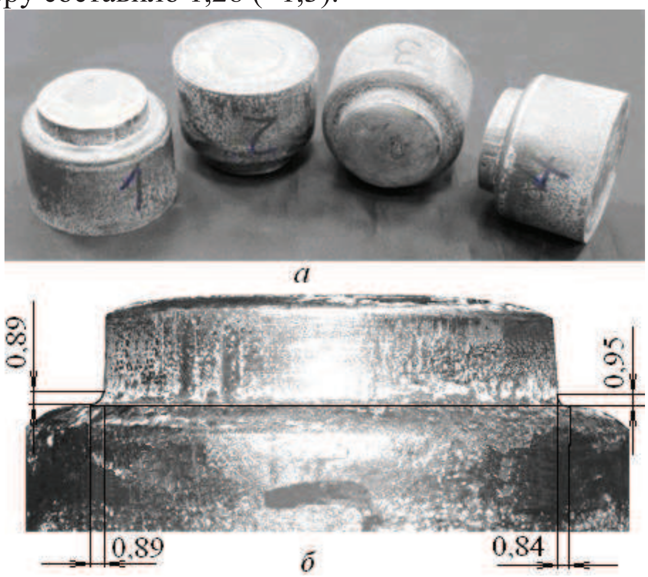

Рисунок 3. Образцы полученные при прямом выдавливании в матрицу без радиуса закругления: *а* – образцы; *б* - измерение формы естественного течения материала

При расчёте мощности деформации по выражению (10) использовали модель сопротивления деформации Хензеля-Шпиттеля с коэффициентами, определёнными для сплава АД35. Температуру принимали 450 ºС, фактор трения 0,3, скорость деформирования 2 мм/с, отношение A = 1,3.

Заключение

По результатам расчёта задачи минимизации функции $N(R)$ были определены графики зависимости отношения отхода материала от стенки штампа к радиусу выходного канала матрицы (R/b) от отношения высоты материала в матрице к радиусу выходного канала матрицы (h/b) для различных отношений a/b и $(a - b)/R_0$. Результаты расчётов, представляющих собой указанные графики, показаны на рисунках 4, 5 и 6. По данным графикам, зная геометрические отношения h/b, a/b и $(a - b)/R_0$ для конкретного штампа, можно определить отношение R/b по которому, в свою очередь, зная величину радиуса выходного диаметра матрицы b, можно определить наименьший радиус при котором материал не будет отходить от стенки штампа, т.е. определить оптимальный радиус в матрице.

По кривой, определяющей зависимость отношения R/b от отношения h/b, построенной для отношений a/b = 1,4 и $(a - b)/R_0$ = 2, т.е. при отношениях соответствующих геометрии экспериментальной оснастки, можно определить, что при отношении h/b = 1,74 отношение R/b = 0,065 (рисунок 4 - 6). Тогда расчётный оптимальный радиус будет равен R = 0,94, а погрешность расчёта относительно эксперимента соответственно равна 2%.

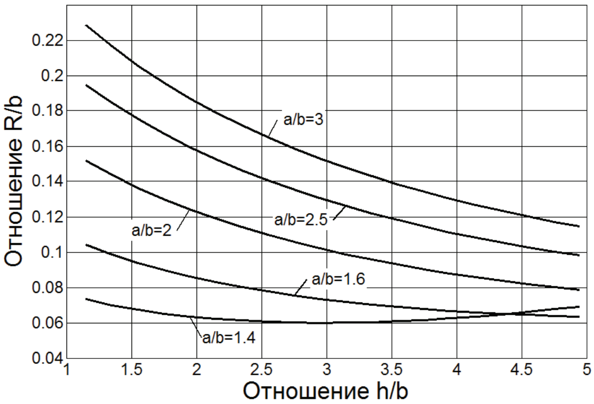

Рисунок 4. Зависимости отношения *R*/*b* от отношения *h*/*b* при (*a* - *b*)/R_0 = 2

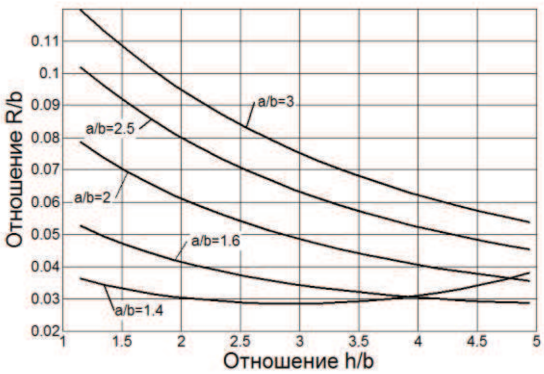

Рисунок 5. Зависимости отношения *R*/*b* от отношения *h*/*b* при (*a* - *b*)/R_0 = 5.

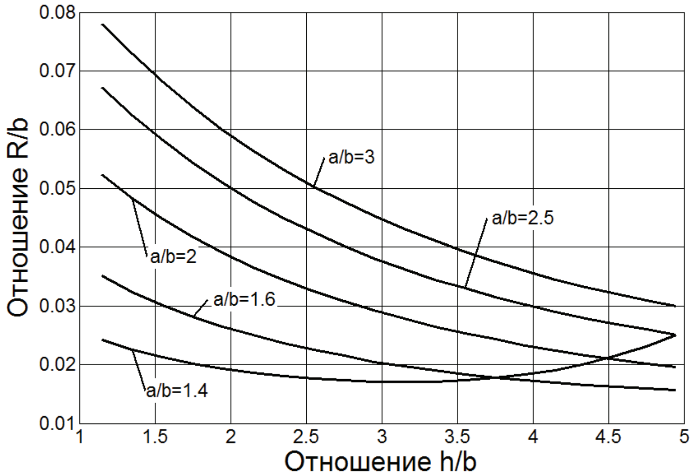

Рисунок 6. Зависимости отношения *R*/*b* от отношения *h*/*b* при (*a* - *b*)/R_0 = 10

Литература

1. Расчёты процессов обработки металлов давлением / Степанский Л.Г. М.: "Машиностроение", 1979 - 215с.
2. Разработка технологии процессов выдавливания в условиях холодной и горячей деформации на основе уточненных моделей сопротивления деформированию / Петров П.А.: дис. к.т.н. М. 1999.
3. Коллоидно-графитовые смазочные материалы в процессах горячего деформирования сталей и сплавов. / Петров А.Н.: Монография МГМУ "МАМИ" 2012 - 212с.
4. Определение модели сопротивления деформации по найденным изотермическим кривым текучести с применением современных компьютерных программ / Потапенко К.Е., Воронков В.И., Петров П.А.: Заготовительные производства в машиностроении, №8 2013 – с. 32-38.
5. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением. Учебное пособие по направлению 150201 (651400) "Машиностроительные технологии и оборудование", специальности 150201 (120400) "Машины и технология обработки металлов давлением" / Калпин Ю. Г. [и др.]. Москва, 2011.
6. Совершенствование математической модели сопротивления горячей деформации. / Калпин Ю.Г., Петров П.А., Бойко Н.А. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2007. № 12 - с. 37-42.