

### Литература

1. Петров А.Н., Андрейченко Т.П. Применение коллоидно-графитовых смазочных материалов при горячей обработке металлов давлением // Кузнечно-штамповочное производство и Обработка металлов давлением. М.: 2008, №6, с.39-41
2. Патент № 2224011, 2004 Смазка для заготовок при горячей и полугорячей обработке металлов давлением. Петров А.Н., Сайранова Т.А., Андрейченко Т.П.

### **Определение коэффициента трения методом осадки кольцевого образца в условиях горячей деформации**

к.т.н. доц. Петров А.Н.

МГТУ «МАМИ»

8-916-505-0754, [alexander\\_petr@mail.ru](mailto:alexander_petr@mail.ru)

*Аннотация.* В данной статье представлен алгоритм расчета и расчет коэффициента (показателя) трения при осадке кольца в условиях горячей деформации. В расчете учитывались температурно-скоростные параметры горячего деформирования: температура заготовки, температура штампов, теплофизические свойства материала заготовки и штампа, параметры оборудования. Получены расчетные кривые зависимости  $\mu = \mu(\tau)$ . Приведены сравнительные результаты расчетов и экспериментов по осадке кольцевых образцов в горячем состоянии.

*Ключевые слова:* горячая объемная штамповка, трение, коэффициент (показатель) трения, метод осадки кольца.

Трение является одним из важных факторов в технологических процессах деформирования металлов и сплавов и численное значение трения, выраженное в виде коэффициента (показателя) или фактора трения, дает представление о том, как течет металл, какие при этом усилия и какая геометрическая точность поковок при этом получается.

Под коэффициентом трения в обработке металлов давлением чаще всего понимают отношение касательного напряжения на поверхности контакта заготовки со штампом к пределу текучести (или интенсивности напряжений) деформируемого металла. В таком понимании этот показатель, как правило, фигурирует в формулах для определения усилия штамповки, оптимального угла матрицы при выдавливании др.

Известны разнообразные методы определения коэффициента трения при обработке давлением, из которых наиболее простым и надежным является метод осадки кольцевых образцов. Теоретические основы этого метода разработаны А. Мэйлом, М. Кокрофтом, М. Бургдорфом и др. Изменение формы кольцеобразного образца при сжатии зависит от деформации в осевом направлении и коэффициента трения. При значительном напряжении трения, действующего на контактной поверхности, в очаге деформации можно выделить две зоны, разделенные цилиндрической поверхностью, имеющей радиус  $r_0$ . Металл, находящийся на расстоянии  $\rho$  от оси образца, при  $r_0 < \rho < R$  течет в радиальном направлении от оси образца ( $R$  – радиус наружной поверхности кольца); при  $r < \rho < r_0$  – к оси образца ( $r$  – радиус внутренней поверхности кольца). Положение границы раздела течения, а следовательно, и текущие значения  $R$  и особенно  $r$ , существенно зависят от коэффициента трения. При уменьшении коэффициента трения величина  $r_0$  уменьшается и может выходить за пределы образца. Для нахождения коэффициента трения по результатам испытаний необходимо расчетным путем построить зависимость какого-либо из размеров осаживаемого образца (чаще всего внутреннего диаметра) от усредненной деформации в осевом направлении и от коэффициента трения.

А. Т. Мэйл и др. решили эту задачу методом работ, определив положение границы раздела течения  $r_0$  из условия минимума полной мощности или (работы) деформации; при этом

под коэффициентом трения понималось отношение касательных напряжений к пределу текучести деформируемого металла. Диаграммы, построенные А. Т. Мэйлом и др., можно с успехом использовать для определения коэффициента (показателя) трения при холодной деформации слабо упрочняющегося металла, реологическое поведение которого можно достаточно точно описать схемой идеально пластичного материала. Однако для нагретого металла, реологической схемой которого является вязкий или вязкопластический материал, при построении диаграмм необходимо учитывать зависимость сопротивления деформированию от скорости деформации. Кроме того, при горячей штамповке наблюдается резко неоднородное температурное поле в деформируемом образце, в то время как основной объем металла сохраняет или почти сохраняет исходную температуру нагрева заготовки, поверхностный слой, контактирующий с холодным штампом, существенно охлаждается, и его сопротивление деформированию увеличивается. Из-за этого контактные касательные напряжения даже при малых значениях коэффициента трения резко возрастают.

Получить действительные значения коэффициента трения при горячей деформации с помощью расчетных номограмм можно, если учесть фактическое изменение температуры контактной поверхности и связанные с этим изменения положения границы раздела течения. При расчете температуры контактной поверхности заготовки принимаем следующие допущения.

1. Штампы и заготовка считаются полубесконечными телами, решается линейная тепловая задача.
2. Теплопередача от заготовки к штампу учитывается только в процессе активного контакта, т.е. при осадке.

Методика определения положения границы раздела течения заключается в том, что, обозначив радиус границы через  $r_0$ , находят полную мощность деформации, а затем ищут минимум полной мощности, полагая  $r_0$  варьируемым параметром. Для нахождения мощности трения необходимо знать сопротивление металла деформированию при температуре, которую металл имеет по контактной поверхности, т.е. предварительно нужно вычислить эту температуру. Для определения указанных величин применяем метод последовательных приближений.

Алгоритм расчета температуры поверхности заготовки  $T_3$  и радиуса внутренней поверхности при осадке следующий:

1. Задаем коэффициент трения  $\mu$ .
2. Задаем шаг расчета по высоте образца  $\Delta H$ .
3. Вычисляем текущую высоту образца.
4. Вычисляем время от начала осадки до конца этапа.
5. Находим текущую скорость деформирования.
6. Определяем среднюю скорость деформации.
7. Задаем радиус  $r_0$  границы раздела течения в пределах.
8. Задаем шаг расчета по радиусу образца  $\Delta r$ .
9. Вычисляем текущее значение радиуса.
10. Вычисляем радиальную скорость перемещения металла.
11. Задаем температуру на контактной поверхности заготовки, например, следующим образом.
12. Вычисляем сопротивление металла деформированию на контактной поверхности.
13. Запоминаем температуру на контактной поверхности  $T_k = T$ .
14. Вычисляем расчетную температуру на контакте (без учета прослойки окалина и смазки), возникающую при соприкосновении заготовки со штампом с учетом тепловыделения от трения.
15. Уточняем температуру заготовки на контактной поверхности.
16. Сравниваем значения  $T$  и  $T_k$  и, если разность превышает заданную точность вычисления

температуры, повторяем п.п. расчета 12–16.

17. Запоминаем значения  $\rho$  и  $\sigma_i$  для данного  $\rho$ .

18. Вычисляем новое значение текущего радиуса  $\rho$  и повторяем п.п. расчета 10-18 до тех пор, пока  $\rho < R$ .

19. Вычисляем сопротивление металла деформированию вдали от контактной поверхности.

20. Вычисляем мощность пластической деформации, пренебрегая при этом изменением температуры вблизи контактной поверхности.

21. Определяем мощность контактного трения.

22. Находим полную мощность деформации.

23. Вычисляем новое значение радиуса границы раздела течения и повторяем п.п. расчета 9-23.

24. Запоминаем значение  $r_0$ , соответствующее минимальному значению полной мощности деформации.

25. Запомнив значение внутреннего радиуса в начале 7 этапа  $r_H = r$ , вычисляем внутренний и наружный радиусы образца в конце этапа осадки

$$r = \sqrt{\frac{r_H^2 [H_0 - \Delta H(\rho - 1)] - r_0^2 \Delta H}{H_0 - \Delta H \rho}} \quad (1)$$

$$R = \sqrt{\frac{R_H^2 [H_0 - \Delta H(\rho - 1)] - r_0^2 \Delta H}{H_0 - \Delta H \rho}} \quad (2)$$

26. Повторяем пункты расчета 3–25 для следующего этапа осадки пока  $H < H_K$ .

27. Расчет повторяем для нового значения коэффициента трения.

Расчет был выполнен для следующих исходных данных:

1.  $n_0 = 75$  об/мин, 36 об/мин;  $R_K = 0,05$  м, 0,25 м;  $\lambda = 0,0714$ , 0,172;

2.  $T_{заг} = 1150^\circ\text{C}$ ,  $1200^\circ\text{C}$ ;

3.  $T_{ум} = 100^\circ\text{C}$ ,  $200^\circ\text{C}$ ,  $300^\circ\text{C}$ ;

4.  $\sigma_0 = 18,5$  МПа (углеродистая сталь 40, 50, 40X) и  $\sigma_0 = 14,7$  МПа при  $\dot{\varepsilon}_{i_0} = 5 \times 10^{-4} \text{c}^{-1}$  и  $T_0 = 1150^\circ\text{C}$  и  $1200^\circ\text{C}$  [66];

5.  $n = 0,16$ ;

6.  $\lambda_{ум} = 37$  Вт/м x °K [67];

7.  $\lambda_{заг} = 29$  Вт/м x °K и 30 Вт/м x °K для стали 40 [82];

8.  $a_{ум} = 6 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  [68];

9.  $a_{заг} = 5,3 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  (сталь 40) [68,82];

10.  $Z = 0,0001$  м [67];

11.  $m = 3,5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  [69].

Полученные номограммы, рисунок 1 трансформировали в график  $\mu = \mu(r)$  для температуры штампов 100, 200 и 300°С, рисунок 2.

Экспериментальную часть выполняли на кольцевых образцах из стали 40. Образцы осаживали, рисунок 3 на механическом прессе с использованием коллоидно-графитовых смазочных материалов на водной основе АГ-4 и ОГВ-75. Условия эксперимента максимально совпадали с условиями расчета.

Смазочные материалы АГ-4 и ОГВ-75 представляют собой водные графитовые суспензии с дисперсностью графита менее 1 мкм. Концентрат этих материалов может быть разбавлен водой в зависимости от сложности штампуемой детали.

Полученные результаты эксперимента сравнивали с расчетами А.Мэйла и с вышеприведенными расчетами. В таблице 2 приведено сравнение расчетов и эксперимента.

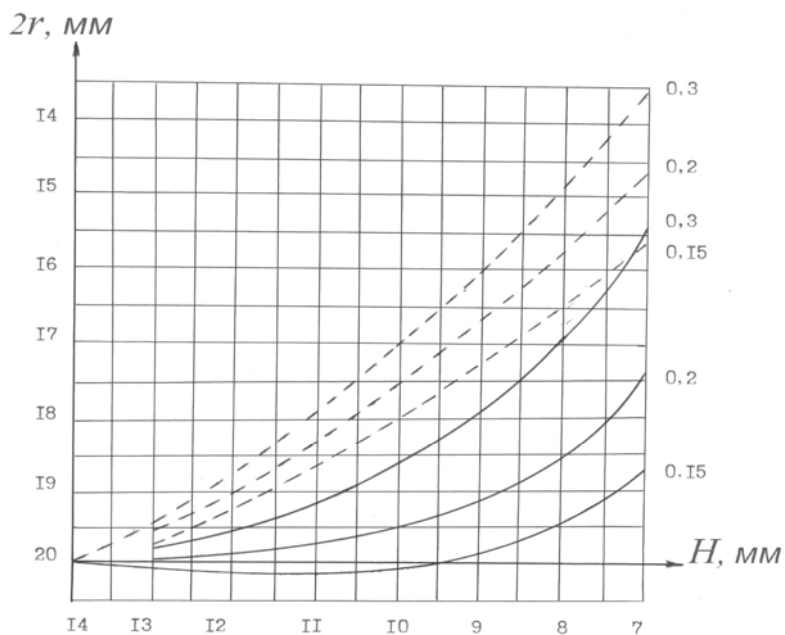


Рисунок 1 – Значения  $\mu$ : по А.Мэйлу; - - - - - расчетные

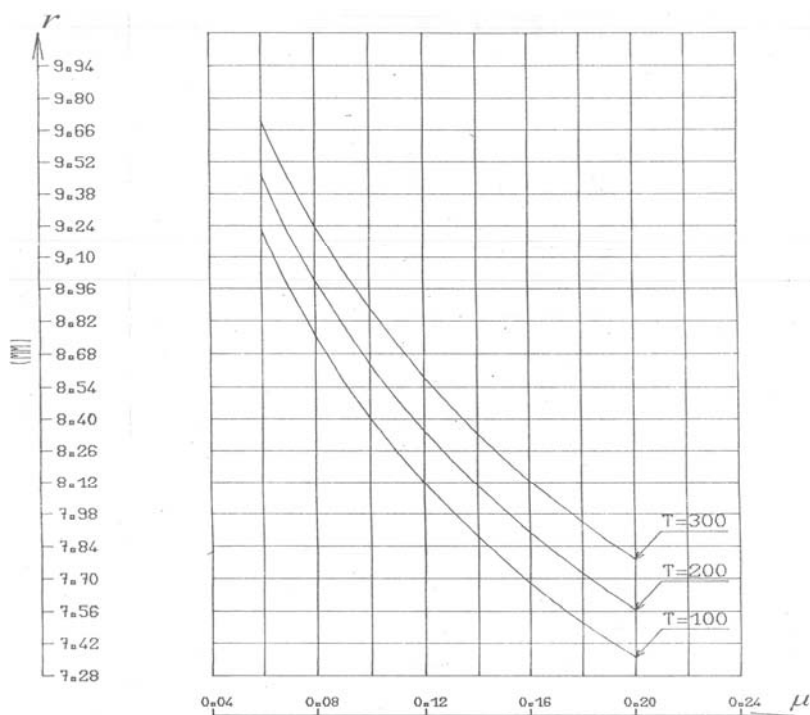


Рисунок 2 – График  $\mu = \mu(r)$  для  $T$  шт. = 100, 200 и 300° С

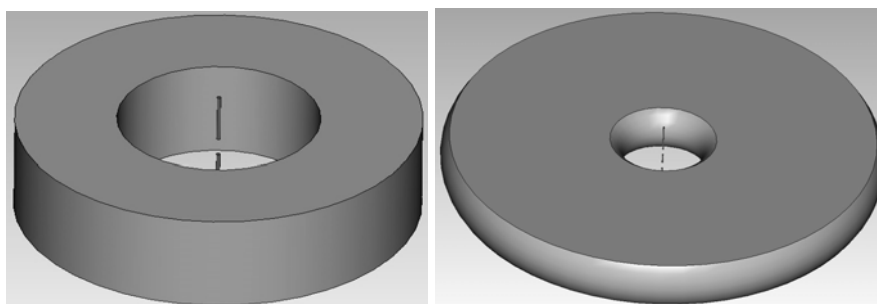


Рисунок 3 – Образец до и после осадки

**Сравнение расчетов и эксперимента**

Марка	Внутренний диаметр d мм		
	Эксперимент $T_{шт} < 200^{\circ}C$	Расчет Мэйла $T_{шт}$ не учитывается	Расчет автора $100 \leq T_{шт} \leq 200^{\circ}C$
ОГВ-75	14,409	14,448	14,362÷14,342
АГ-4	14,545	14,574	14,580÷14,529

Численные значения вышеприведенного расчета хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Существенное влияние оказывают температура нагрева заготовки и температура штампа.

**Выводы**

1. Разработана методика расчета коэффициента (показателя) трения для условий горячей деформации и построены номограммы. Построен график определения коэффициента (показателя) трения для температур штампов  $T = 100, 200$  и  $300^{\circ}C$ . Расчеты А.Мэйла дают завышенные результаты.
2. Используя полученные численные значения коэффициента (показателя) трения для температуры штампа в диапазоне  $200 \div 300^{\circ}C$ , можно прогнозировать стойкость штампов и оптимизировать работу штампов за счет выбора режимов нанесения смазочных материалов: времени нанесения и степени разбавления концентрата.

**Литература**

1. Петров А.Н., Андрейченко Т.П. Применение коллоидно-графитовых смазочных материалов при горячей обработке металлов давлением // Кузнечно-штамповочное производство и Обработка металлов давлением. М.: 2008, №6, с.39-41
2. Петров А.Н. Комплексная оценка свойств коллоидно-графитовых смазочных материалов для процессов горячего деформирования металлов и сплавов // Кузнечно-штамповочное производство и Обработка металлов давлением. М.: 2011, №10, с 45-48

**Численное исследование трения при высадке с радиальным выдавливанием деталей типа «стержень с утолщением» из алюминиевого сплава АД1**

к.т.н. Петров М.А., к.т.н. доц. Петров П.А., д.т.н. проф. Калпин Ю.Г.  
МГТУ «МАМИ»  
p.petrov@mami.ru

*Аннотация.* В данной статье выполнено исследование влияния контактного трения на течение материала в комбинированном процессе с бегущим очагом деформации. Рассмотрены различные способы задания граничных контактных условий между деформируемым материалом и поверхностями инструмента. Численное (компьютерное) моделирование исследуемого процесса выполнено с применением программного комплекса QFORM, основанного на методе конечных элементов. Рассматриваемый процесс является сложным [1]. Высота утолщения, формируемого на стержневой части заготовки, принята в качестве контрольного параметра при выполнении сравнительного анализа результатов компьютерного моделирования с результатами экспериментов. Исследовано также влияние фактора трения, определяющего высоту утолщения, его форму и течение металла. Результаты компьютерного моделирования сопоставлены с результатами экспериментов. Получено их хорошее качественное и количественное соответствие.

*Ключевые слова:* моделирование, ОМД, радиальное выдавливание или поперечное выдавливание, высадка, фактор трения, смазка, алюминиевый сплав АД1, QForm