

**References:** 1.Явтушенко А.В., Серeda Б.П., Васильченко Т.А., Глебенко А.В. Математическая модель планетарного привода кривошипных прессов. Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». -Київ,2010.-Вип.№60. С.200-203. 2.Явтушенко А.В., Глебенко А.В., Васильченко Т.А., Видмич С.С. Динамическая модель планетарного привода кривошипных прессов. Вісник Кременчуцького державного технічного університету ім. М.Остроградського. – Кременчук, КДТУ, 2009.- Вип.6/2009(59, частина 1). С.44-48. 3.Власов В.И. Системы включения кривошипных прессов. - М.: Машиностроение.- 1969-272с.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КУЗНЕЧНО- ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.771

*АЛИЕВ И.С.*, докт. техн. наук, проф., ДГМА, г. Краматорск

*ЖБАНКОВ Я.Г.*, ассистент кафедры ОМД, ДГМА, г. Краматорск

### УЧЕТ ТРЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МЕТОДАМИ ВЕРХНЕЙ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ С НИЗКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОДПОРА

Проведено дослідження по встановленню закономірностей пластичного тертя. Запропонований підхід врахування тертя в математичних моделях верхньої оцінки для схем штампування із низьким коефіцієнтом підпора.

Investigations to determine the regularities of plastic friction are made. Proposed an approach taking to account the friction in the mathematical models developed by the upper bound methods of the schemes forming with the low pressure.

Проведены исследования по определению закономерностей пластического трения. Предложен подход учета трения в математических моделях разрабатываемых методом верхней оценки для схем штамповки с низким коэффициентом подпора.

Ни один из процессов обработки металлов давлением не протекает без влияния на него сил трения. Трение возникает на поверхности контакта инструмента и деформируемого тела (заготовки). Одной из характерных особенностей трения при пластической деформации является наличие больших нормальных давлений на контактной поверхности, которые во многих случаях значительно превышают величину предела текучести обрабатываемого металла [1-4].

Трение в процессе пластической деформации присутствует в виде контактных напряжений, находящихся на поверхности контакта инструмента и заготовки. Контактные напряжения играют как отрицательную [5] (повышение усилия деформирования, снижение стойкости инструмента, повышение неоднородности деформаций в заготовке) так и положительную (является управляющим фактором в формоизменении некоторых процессов выдавливания)

роль [2, 6].

Одним из способов управления величинами контактных напряжений трения в процессах обработки давлением является использование смазок.

При математическом решении задач обработки металлов давлением практически всегда используются закономерности трения в той или иной форме. И корректное решение поставленной задачи зависит от правильного задания граничных условий процесса, среди которых основное место занимает условие трения на поверхности заготовки и инструмента [7, 8].

Корректное задание граничных условий в виде распределения контактных напряжений трения при моделировании процессов обработки давлением является залогом правильного решения поставленной задачи.

В литературе известен ряд законов описывающих зависимости контактных напряжений в процессах обработки давлением [1, 2]. Для процессов с небольшим коэффициентом подпора (отношение давление выдавливания к пределу текучести металла) до 2-3 единиц принято использовать закон Амонтона [1], для процессов с высоким коэффициентом подпора более 2-3 единиц принято использовать закон трения Зибеля [1].

Также существует закон трения, который описывает зависимость контактных напряжений от нормальных напряжений и напряжения течения металла в приконтактной зоне, предложенный А. Н Левановым, который учитывает и закон Амантона и закон трения Зибеля, пригодный для процессов с малым и повышенным коэффициентом подпора [2]. Формула, отражающая закон трения Леванова приведена ниже:

$$\frac{\tau_k}{\tau_s} = K_{\Pi} \cdot (1 - e^{-1.25 \frac{\sigma_n}{\sigma_s}}), \quad (1)$$

где  $\tau_k$  - контактное напряжение, возникающее между деформируемым и деформирующим телами, МПа;  $\tau_s = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s$  - напряжение сдвига, МПа;  $\sigma_s$  - истинное сопротивление течения деформируемого металла, МПа;  $K_{\Pi}$  - константа поверхности;  $\sigma_n$  нормальное напряжение на поверхности контакта, МПа.

Данная зависимость используются при теоретическом решении задач обработки давлением. Важным является уточнение коэффициентов используемых в зависимости (1) для более корректного теоретического описания процессов пластического деформирования.

Целью данной работы является уточнение зависимости контактных напряжений трения между заготовкой и инструментом в процессах обработки давлением при различных условиях между инструментом и заготовкой и использование ее при теоретическом анализе.

Для уточнения зависимости контактных напряжений трения были проведены экспериментальные исследования. Исследования проводились по схеме прямого выдавливания с разделением поверхности трения (рис. 1 а).

Для измерения показаний трения использовались аналого-цифровой преобразователь (АЦП) L-Card E440 (рис. 1 б), преобразователь переменного тока АГАТ (рис. 1 в) и мессдоза спаянная по мостовой схеме (рис. 1 г), обработка сигналов производилась на ЭВМ.

Перед тем как измерять силу трения проводилась тарировка месдозы. Тарировка проводилась нагрузкой месдозы от 6 до 18 кН с паузами через каждые 4 кН (рис. 2). На месдозу подавалось напряжение постоянного тока в 8 В от преобразователя АГАТ. По результатам тарировки строилась зависимость величины отклонения показаний АЦП от величины нагрузки месдозы и находилась аппроксимацией их линейная зависимость, с помощью которой преобразовывались данные, полученные при измерении трения.

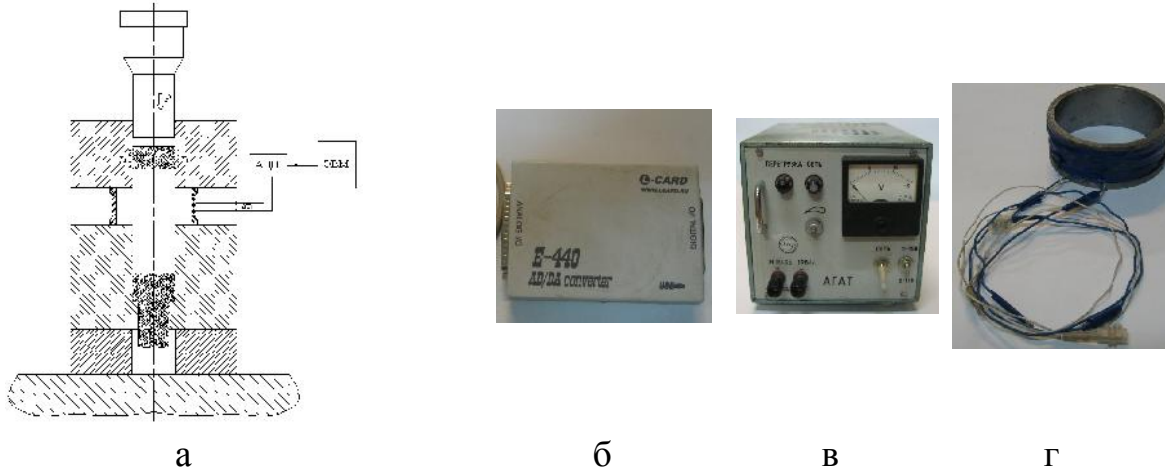


Рис. 1. Схема установки для измерения силы трения [9] и общий вид приборов использованных при экспериментальных исследованиях

Тарировка месдозы проводилась перед каждой серией экспериментов для уменьшения влияния посторонних факторов на величину получаемых после обработки сигналов данных.

Проводились исследования зависимости контактного напряжения трения между свинцом и инструментальной сталью при различных условиях. Проводились эксперименты со смазкой на поверхности заготовки, без смазки и поверхность заготовки и инструмента обезжиривали. Шероховатость поверхности инструмента по 6 классу.

Часть экспериментальных данных, по исследованию закономерностей трения полученных в виде осциллограмм в пакете LGraph2, приведены на рис. 2.

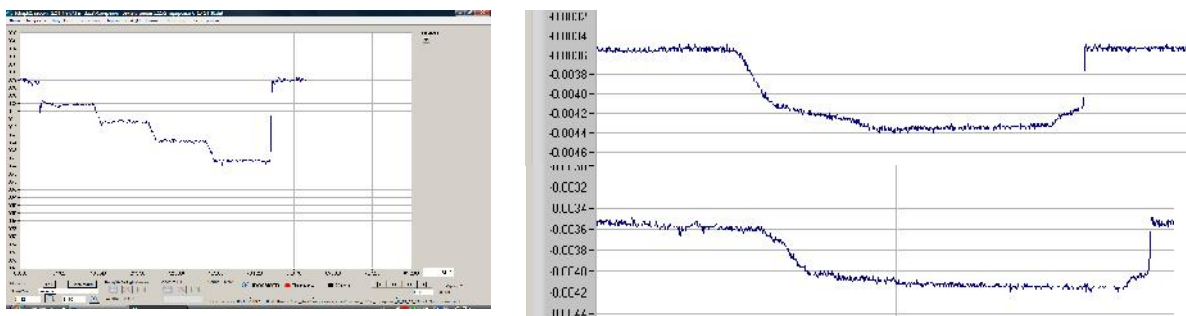


Рис. 2. Тарировка месдозы в программном пакете LGraph2 и общий вид осциллограмм, полученных по результатам измерения сил трения

При помощи тарировочного графика обрабатывались сигналы месдозы и получали значения сил трения на поверхности трения.

Помимо измерения силы трения также измерялось и сила деформирования

с помощью датчика установленного на испытательной машине.

Зная силу трения на поверхности трения и размеры поверхности трения (принимали фактическую величину поверхности трения равной номинальной), определяли контактное напряжение трения по формуле:

$$\tau_k = \frac{P_k}{F_k}, \quad (2)$$

где  $P_k$  - сила трения, Н;

$F_k$  - поверхность трения, мм<sup>2</sup>.

Далее зная напряжение текучести ( $\sigma_s$ ) для данного материала определяли величину  $\tau_k / 2 \cdot \tau_s$ .

Воспользовавшись законом пластичности Губера-Мизеса [3, 4] (3) и предположив, что  $\sigma_z = \sigma_{\max}$ , а  $\sigma_i = \sigma_s$ , определяем  $\sigma_n = \sigma_R = \sigma_z - \sigma_s$ .

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \sigma_i. \quad (3)$$

По результатам обработанных экспериментальных данных была построена зависимость отношения контактного напряжения к напряжению сдвига в прикотнактном слое заготовки от отношения нормального напряжения к напряжению текучести. Результаты приведены на рис. 3.

Видно, что при увеличении относительных нормальных напряжений ( $\sigma_n / \sigma_s$ ) относительные контактные напряжения ( $\tau_k / 2 \cdot \tau_s$ ) также возрастают, однако рост прекращается при больших величинах  $\sigma_n / \sigma_s$  (больших 5 единиц).

Данные, полученные по экспериментальным исследованиям хорошо аппроксимируются зависимостью предложенной Е.М. Макушком, которая позднее была использована для описания закономерностей трения А.Н. Левановым.

Путем подбора коэффициентов аппроксимации для закономерности, используемой А.Н. Левановым, был установлен наилучший вид зависимости относительных контактных напряжений от относительных нормальных напряжений для аппроксимации полученных экспериментальных данных. Формула (4) для случая, когда использовалась смазка на поверхности инструмент – заготовка, (5) без смазки и (6) обезжиренная поверхность.

$$\tau_k / 2 \cdot \tau_s = 0,12 \cdot (1 - e^{-0,75 \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_s}}). \quad (4)$$

$$\tau_k / 2 \cdot \tau_s = 0,34 \cdot (1 - e^{-0,75 \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_s}}). \quad (5)$$

$$\tau_k / 2 \cdot \tau_s = 0,42 \cdot (1 - e^{-0,75 \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_s}}). \quad (6)$$

Соотношение  $\tau_k / 2 \cdot \tau_s$  не что иное, как коэффициент трения Зибеля [3]. Также графическую зависимость относительных контактных от относительных нормальных напряжений приведенную на рис. 3 можно представить в несколько ином виде.

Не используя принятые ранее допущения о том, что  $\sigma_z = \sigma_{\max}$ , а  $\sigma_i = \sigma_s$ ,

строим зависимость  $\tau_k/2 \cdot \tau_s$  от  $\sigma_z/\sigma_s = \bar{p}$  (рис. 4).

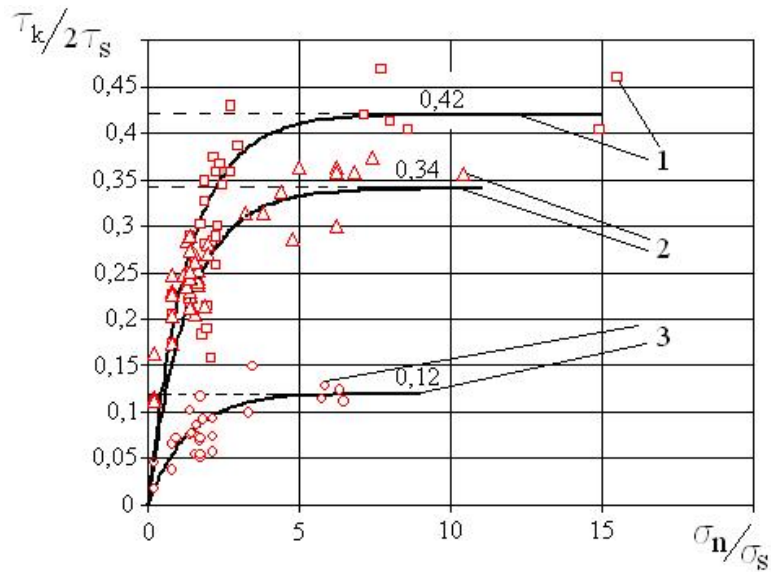


Рис. 3. Зависимость относительного контактного напряжения от относительного нормального напряжения с аппроксимирующими зависимостями при различных условиях трения (1 – обезжиренная поверхность заготовки и инструмента, 2 – без смазки, 3 – на заготовку наносилось индустриальное масло)

Также возможно преобразовать и зависимости (4-6). После преобразования они принимают следующий вид:

$$\tau_K / 2 \cdot \tau_s = 0,12 \cdot (1 - e^{-0,75 \cdot (\bar{p} - 1)}) \quad (7)$$

$$\tau_K / 2 \cdot \tau_s = 0,34 \cdot (1 - e^{-0,75 \cdot (\bar{p} - 1)}) \quad (8)$$

$$\tau_K / 2 \cdot \tau_s = 0,42 \cdot (1 - e^{-0,75 \cdot (\bar{p} - 1)}) \quad (9)$$

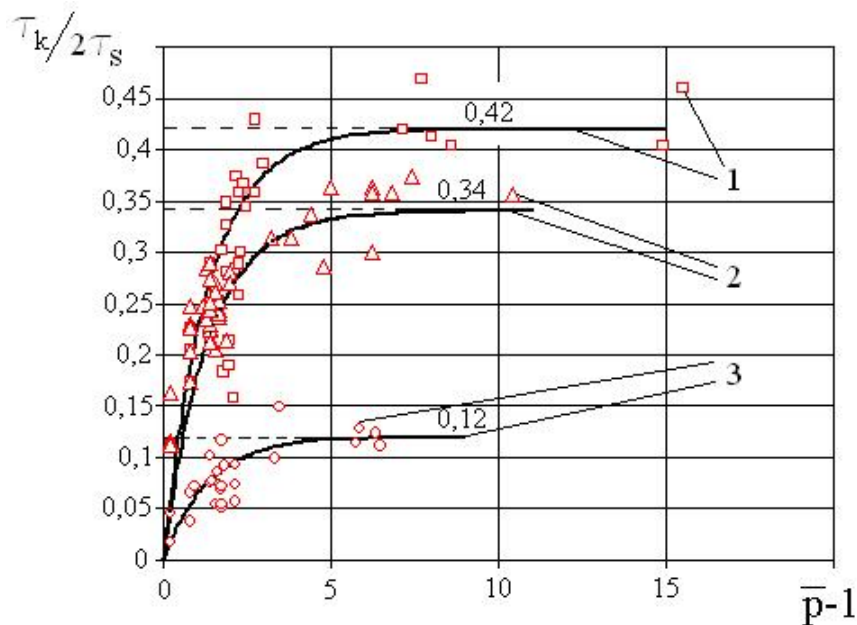


Рис. 4. Зависимость относительного контактного напряжения от приведенного давления с аппроксимирующими зависимостями при различных условиях трения (1 – обезжиренная поверхность заготовки и инструмента, 2 – без смазки, 3 – на заготовку наносилось машинное масло)

При теоретическом решении задач обработки металлов давлением методами верхней оценки используется закон трения Зибеля для определения контактных напряжений. Основным допущением закона трения Зибеля является постоянство коэффициента трения на всей поверхности контакта между инструментом и заготовкой при определенных условиях трения. Одним из таких условий, как было отмечено выше, является значение коэффициента подпора большее 2-3 единиц.

Существует большое количество процессов деформации, в которых это значение меньше 3 единиц. Таким образом, при решении задач, в которых коэффициент подпора менее 3 единиц методом верхней оценки с использованием закона трения Зибеля будет давать большое завышение на экспериментальными данными.

Для уточнения теоретических решений получаемых методами верхней оценки (плоская и осесимметричная задачи) предложена следующая методика.

Решается задача по известной методике с определением контактных напряжений по закону Зибеля (коэффициент трения принимается максимальный для данного состояния поверхности трения).

После того как было найдено приведенное давление процесса (с максимальным коэффициентом трения для данных условий трения) по зависимостям (7-9) определяется контактное напряжение и если оно меньше первоначально найденного, то оно подставляется в полученное решение. Таким образом, для решений получаемых МВО производится уточнение оценки силового режима.

Пример такого уточнения, возможно, рассмотреть на моделировании прямого выдавливания (рис. 5).

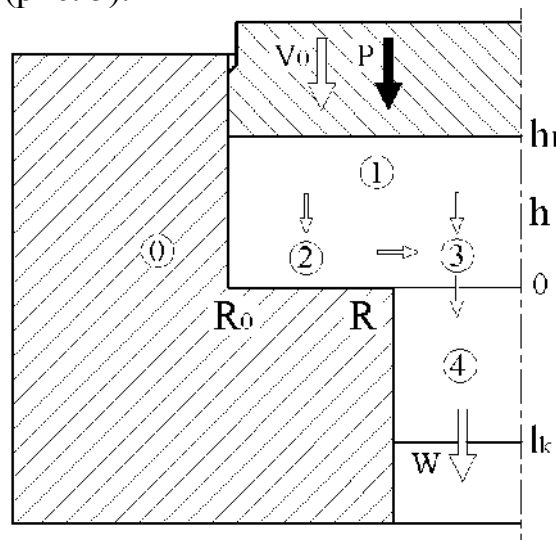


Рис. 5. Расчетная схема процесса прямого выдавливания

По известной методике описанной в работах [3, 4] определено приведенное давление процесса прямого выдавливания в параметрическом виде. Мощность сил трения определяли по формуле:

$$N_T = \iint_{F_k} \tau_k V_k dF_k . \quad (10)$$

При определении мощности сил трения с использованием закона трения Зибеля контактное напряжение вычисляется по формуле:

$$\tau_k = \frac{2}{\sqrt{3}} \mu_s \cdot \sigma_s. \quad (11)$$

Определив приведенное давление процесса выдавливания с использованием закона трения Зибеля, подставляем его значение в формулу (7) и значение уточненного контактного напряжения подставляем в формулу определения мощности сил трения (10), значение которого затем подставляем в уравнение баланса мощностей. Таким образом, происходит уточнение теоретической оценки силового режима процесса выдавливания.

По разработанной математической модели построены графические зависимости приведенного давления от геометрических параметров процесса прямого выдавливания, которые представлены на рис. 6. Показаны данные, полученные по стандартной методике определения мощностей сил трения и по методике направленной на уточнение теоретического решения.

Анализ графиков (рис. 6) позволяет сделать вывод о том, что при уменьшении внутреннего радиуса матрицы приведенное давление прямого выдавливания возрастает, что сказывается на величину поправки силовой оценки процесса. Т.е. предложенная методика эффективно может быть использована для процессов с значениями приведенного давления меньше 5 единиц.

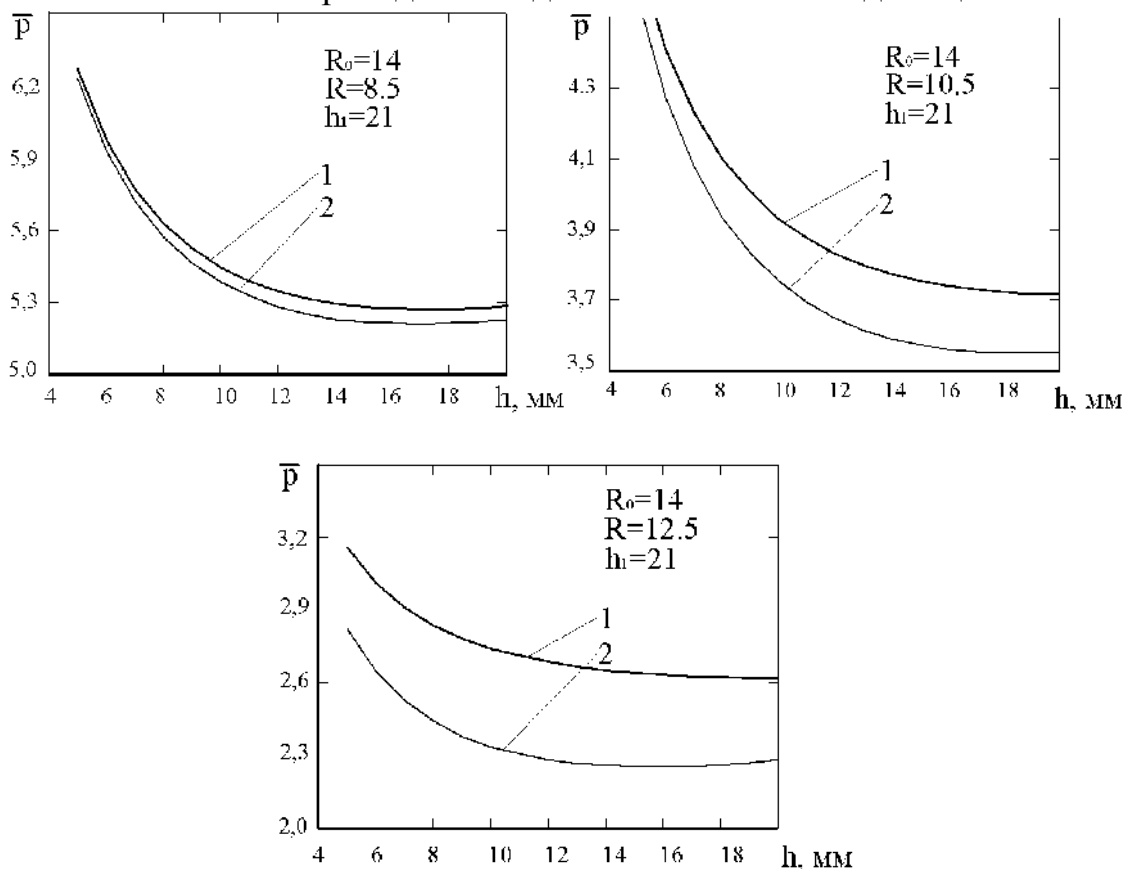


Рис. 6. Зависимости приведенного давления от геометрических параметров прямого выдавливания (кривая 1 – полученная по стандартной методике, кривая 2 – получена с использованием методики уточнения)

Для процесса прямого выдавливания уточнение силовой оценки доходит до 25% при значениях приведенного давления около 2,5 единиц, что говорит о значительном увеличении точности получаемых решений.

## ВЫВОДЫ

Проведены экспериментальные исследования зависимости величины контактных напряжений трения действующих на поверхность заготовки и инструмента при различных условиях трения. Установлено, что наличие смазки на поверхности заготовки величину контактных напряжений трения.

Установлены зависимости, описывающие влияние нормальных напряжений на контактные напряжения трения между свинцовой заготовкой и стальной поверхностью инструмента. Определены коэффициенты для данных зависимостей в условиях наличия смазки на заготовке, без смазки и когда поверхность заготовки и инструмента обезжирены. Полученные зависимости могут быть использованы при теоретическом расчете процессов обработки давлением.

Предложена методика уточнения теоретического решения получаемого методом верхней оценки.

**Список литературы:** 1. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением А.Н. Леванов, В.Л. Колмогоров, С.П. Буркин, Б.Р. Картак, Ю.В. Ашпур, Ю.И. Спассикий - М., «Металлургия», 1976. - 416 с. 2. Трение и смазки при обработке металлов давлением А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик - М.: Metallurgy, 1982. – 312 с. 3. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. / Сторожев М.В., Попов Е.А. - М.: Машиностроение, 1977. – 423 с. 4. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением / Евстратов В.А. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1981. – 248 с. 5. Євстратов В.О. Шлях тертя як важливий чинник зношення штампів / В. О. Євстратов // Обработка металлов давлением: Сборник научных трудов – Краматорск: ДГМА, №2(21), 2009 – С. 378-381. 6. Прессование с активным действием сил трения В.Л. Бережной, В.Н. Щерба, А.И. Батулин - М.: Metallurgy, 1988. - 296 с. 7. Алиев И.С. К вопросу изучения контактного пластического трения / И.С. Алиев, К. К. Крюгер // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Тематичн. зб. наук. праць. Краматорськ: ДДМА. 2002. С. 112-120. 8. Алиев И.С. Измерение сил контактного пластического трения / И.С. Алиев, К.К. Крюгер // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Тематичн. зб. наук. праць. Краматорськ - Хмельницький: ДДМА. 2002. С. 22-29. 9. Алиев И.С. Методы и устройства для исследования контактного пластического трения при объемном пластическом деформировании / И.С. Алиев, К. Крюгер // Кузнечно-штамповочное производство. – 2008. – №1. – С. 3-11.