

Сравнение расчетов и эксперимента

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

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°C . Расчеты А.Мэйла дают завышенные результаты.
2. Используя полученные численные значения коэффициента (показателя) трения для температуры штампа в диапазоне $200 \div 300^{\circ}\text{C}$, 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

Холодная объемная штамповка (ХОШ) является прогрессивной технологией, позволяющей изготавливать штампованные изделия с заданными механическими свойствами, направленным течением материала и расположением волокон, а также с высоким коэффициентом использования материала (КИМ). Известно, что детали типа «стержень с утолщением» изготавливаются одним из следующих методов: электровысадкой, высадкой на ГKM либо механическом прессе в жестком или подпружиненном инструменте, выдавливанием (прямым, обратным или радиальным) [1-4]. Главным недостатком известных технологий является возможная потеря продольной устойчивости стержневой части заготовки. Это обусловлено тем, что за один рабочий ход нельзя набрать утолщение более, чем $L/D > 2,5$, где L – длина (свободная) высаживаемой части стержневой заготовки и D – начальный диаметр стержневой заготовки.

Для повышения эффективности технологии получения деталей типа «стержень с утолщением» предлагается применить схему комбинированного процесса – сочетание высадки и поперечного (радиального) выдавливания – и использовать для этого подпружиненный инструмент, в котором предусмотрена подвижная матрица (рисунок 1а). В результате в процессе деформирования в заготовке появляется бегущий очаг деформации, который перемещается вдоль оси заготовки сверху вниз [1]. С технологической точки зрения, трение образуется на контактных поверхностях между инструментом и заготовкой, что может быть причиной возникновения дефектов и некорректного значения при расчете силовых характеристик процесса [5, 6].

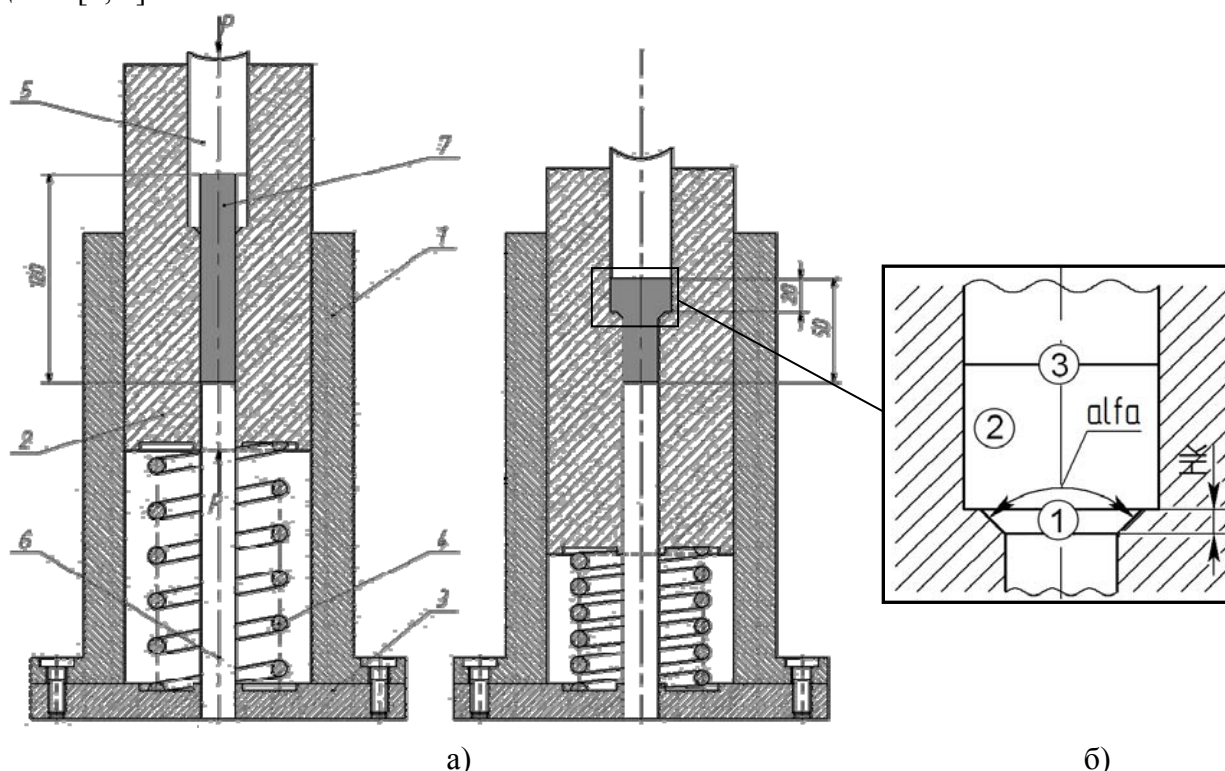


Рисунок 1 – Схема экспериментальной оснастки с подпружиненной матрицей (а) и увеличенный конусный участок с указанием контактных зон (б): 1 – контейнер, 2 – подвижная матрица, 3 – основа, 4 – упругий элемент (пружина), 5 – пуансон, 6 – выталкиватель, 7 – заготовка

Для исследования влияния трения следует учитывать ряд технологических параметров. В исследуемом комбинированном процессе с бегущим очагом деформации – сочетание высадки и поперечного выдавливания – наиболее существенными параметрами являются: геометрия заходной воронки матрицы (рисунок 1б), жесткость упругого элемента (пружины), начальное соотношение L/D . Учитывая различные значения фактора трения, исследована

кинематика образования утолщения.

В процессе деформирования металл контактирует с подвижной матрицей (далее матрица) с образованием двух контактных зон (рисунок 1б). Вначале материал заготовки деформируется за счет высадки. Далее объем металла, который образовался в конической области матрицы – первая зона контакта – отодвигает матрицу вниз, течение металла происходит в радиальном направлении с образованием утолщения. После того, как деформируемый металл касается боковой поверхности цилиндрического участка матрицы, начинается вторая зона контакта. Третья зона контакта - наблюдается на протяжении всего процесса - расположена на торцевой поверхности заготовки и пуансона [7].

Контактное трение в данных зонах изменяется в течение всего процесса и фактора трения может принимать различные значения. Здесь выбор граничных контактных условий для пары трения материалов играет большую роль. Для определения необходимой силы деформирования была разработана математическая модель, подробно представленная в работе [1].

Экспериментальные исследования выполнены с применением сконструированного инструмента (рисунок 1а). Образцы длиной 120 мм были изготовлены из прутка алюминиевого сплава АД1 диаметром 20 мм; химический состав сплава представлен в таблице 1, механические свойства - в таблице 2. Геометрия инструмента позволяет исследовать процесс при максимальном начальном соотношении $L/D = 3$. В данной работе исследования проведены для соотношений $L/D = 1 - 2,5$ с шагом 0,5. Перед проведением эксперимента заготовка и инструмент смазывались водной суспензией молибдена с графитом, при котором достигается фактор трения 0,04. Экспериментальное оборудование – универсальная гидравлическая испытательная машина EU-100 с номинальной скоростью перемещения траверсы 1 мм/с и силой деформирования 10 МН. Испытательная установка EU-100 оборудована приборами и устройствами для автоматизации сбора и обработки экспериментальных данных, включая измерительную аппаратуру фирмы National Instruments – контроллер CRio 9012, программное обеспечение на базе LabView. Установка EU-100 позволяет выполнять испытания образцов металлов и цветных сплавов методом сжатия в диапазоне скоростей деформации от $0,001 \text{ с}^{-1}$ до $0,1 \text{ с}^{-1}$.

Таблица 1.

Химический состав алюминиевого сплава АД1

Химический элемент	Cu	Si	Mn	Mg	Ti	Zn	Fe	Al
Масса, %	0,008	0,19	0,02	0,02	0,006	0,02	0,14	основа

Таблица 2.

Механические характеристики алюминиевого сплава АД1

Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %
83	128	16,8

Диаграмма возможного перемещения матрицы в зависимости от положения пуансона представлена на рисунке 2. Следует отметить, что на диаграмме представлены три зоны: R1, R2 и R3. Они показывают влияние жесткости пружины и контактного трения на характер течения материала. Как показывают результаты, представленные на рисунке 2, наблюдается изменение кинематики изучаемого процесса. Течение материала может быть инициировано либо за счет увеличения длины утолщения (поперечное выдавливание), либо за счет увеличения диаметра утолщения (высадка) [1]. В случае высадки – матрица практически не перемещается (рисунок 2, зона R1); в случае поперечного выдавливания матрица постепенно перемещается в направлении движения пуансона (рисунок 2, зона R2).

Компьютерное моделирование исследуемого процесса проведено в программе QFORM v.4.3.3 lite [8]. В ранее опубликованной работе [9] был использован закон перемещения пуан-

сона, полученный экспериментально. В данной работе перемещение матрицы зависит от заданной жесткости упругого элемента и значения фактора трения. Исходные данные для моделирования представлены в таблице 3.

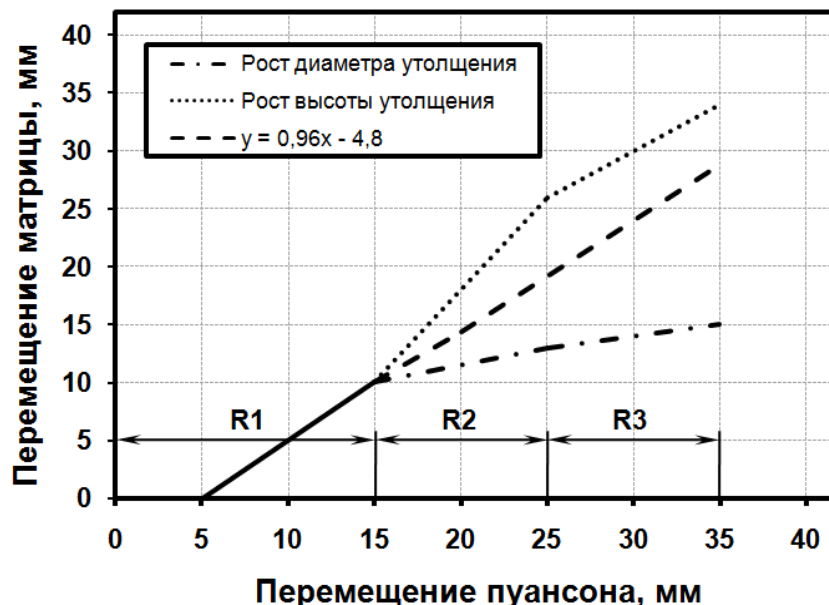


Рисунок 2 – Диаграмма «перемещение матрицы» – «перемещение пуансона»:
R1 – высадка заготовки, R2 – интенсивный рост диаметра/высоты утолщения, R3 –
стабильный рабочий режим, при котором «бегущий» очаг деформирования
перемещается с постоянной скоростью

Таблица 3.

Граничные условия процесса

Параметр	Значение
Время проведения процесса, с	120
Гидравлический пресс	1 мм/с, 10 МН
Жесткость пружины, Н/мм	20; 60 и 100
Температура заготовки, °С	20
Фактор трения	0; 0,04 и материал пары (табл. 4)
Перемещение пуансона, мм	50
Угол заходной воронки, °	30; 60; 90; 120 и 150
Соотношение L/D	1; 1,5; 2 и 2,5
Геометрия	осесимметричное нагружение

Таблица 4.

Значение коэффициента трения [6]

Пара материалов	Значение
Сталь – Сталь (со смазкой)	0,1
Сталь – Сталь (без смазки)	0,15
Сталь – Алюминий (со смазкой)	0,07
Сталь – Алюминий (без смазки)	0,19

Конечное значение перемещения пуансона составляло для всех расчетов 50 мм. Оценка результатов моделирования велась по изменению значения перемещения матрицы, значения высоты набираемого утолщения, а также высоты зоны контакта. Для оценки степени набора утолщения был введен безразмерный параметр «степень заполнения» (СЗ), который рассчитывался по формуле (1):

$$C3 = \left(1 - \frac{S_{БП} - S_{КП}}{S_{БП}} \right) * 100\%, \quad (1)$$

где: $S_{БП}$ – площадь боковой поверхности объема, образованного пуансоном и верхним торцом конической полости матрицы;

$S_{КП}$ – площадь контактной поверхности объема, образованного деформированным объемом металла, образующего утолщение, диаметр которого соответствует диаметру наборного участка матрицы (пуансона).

Результаты проведенного компьютерного моделирования показывают следующее. При различных значениях фактора трения [1] наблюдается хорошее совпадение результатов моделирования и эксперимента, если на формообразующей поверхности матрицы есть смазка и задаваемое при моделировании значение фактора трения равно значению фактора трения смазки. Различие в двух случаях (рисунок 3б и 3в) обусловлено формой конической части набираемого утолщения и качеством его боковой поверхности.

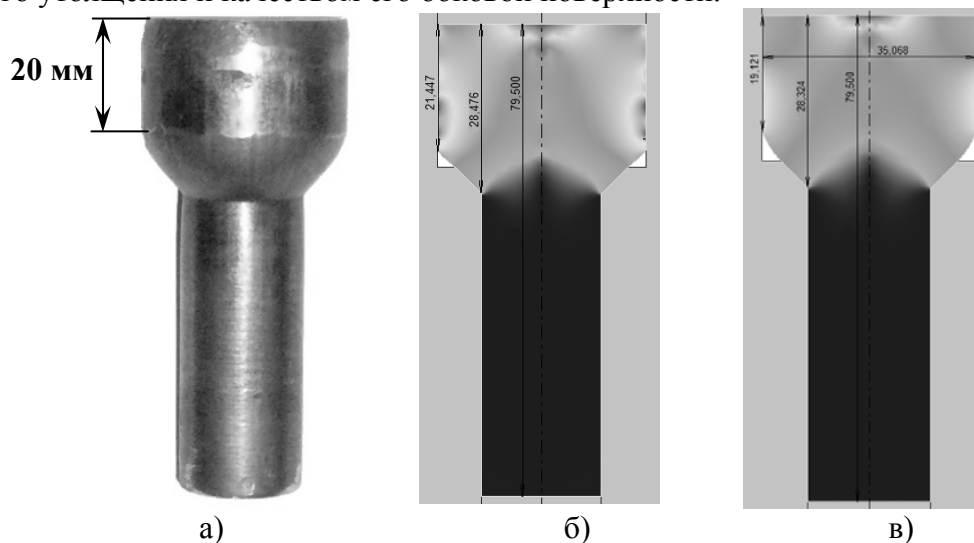


Рисунок 3 – Сравнение результатов эксперимента (а) с результатами моделирования (б и в) (а – смазка с фактором трения 0,04; б – фактор трения на контактной поверхности переменный: с пуансоном и выталкивателем – 0,237, с матрицей – 0,125; в – фактор трения постоянный и равный 0,04)

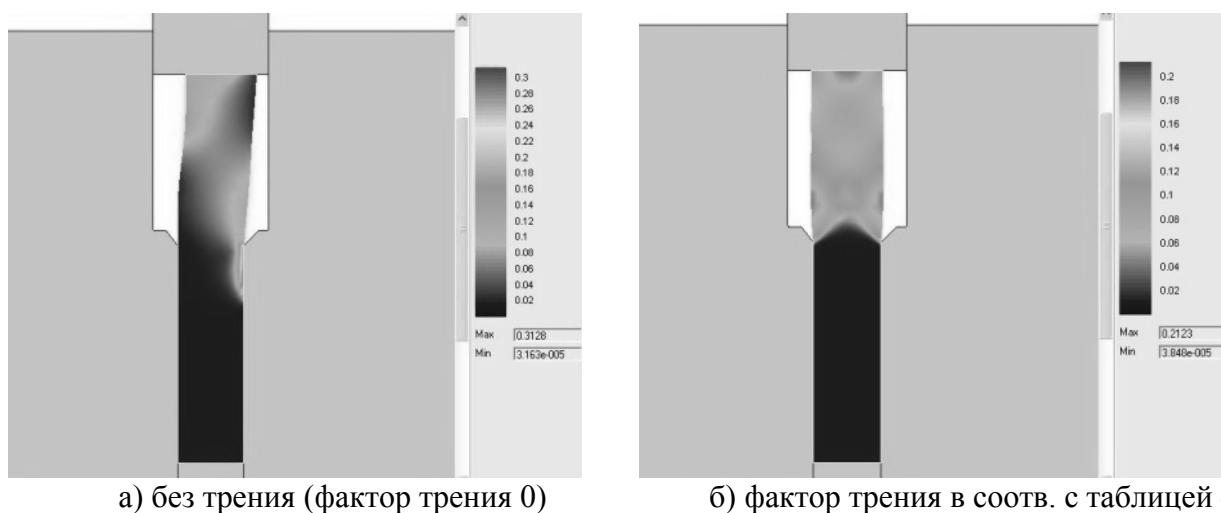


Рисунок 4 – Потеря продольной устойчивости при моделировании плоской задачи с начальным соотношением $L/D = 2,5$ и толщиной сечения 0,5 мм приблизительно через 3 секунды после начала деформирования (тоновая расцветка заготовки соответствует распределению интенсивности напряжения)

Выпуклая форма конической части указывает на интенсивное течение металла из конической зоны деформирования в зону формирования утолщения со скоростью, соответствующей скорости перемещения матрицы в текущий момент времени. Совпадение геометрической формы утолщения, полученного на экспериментальном образце, с формой расчетного образца наблюдается при проведении моделирования по схеме, представленной на рисунке 3в. Высота утолщения готового изделия составляет 20 мм (рисунок 3а). Это значение является промежуточным между значениями, полученными по результатам моделирования (рисунки 3б и 3в). На боковой стороне деформированной заготовки виден дефект, возможной причиной образования которого является неравномерное нанесение смазки на поверхность матрицы. Случай, представленный на рисунке 3б, является подходящим при рассмотрении неравномерного нанесения покрытия, причем возникающее трение замедляет перемещение матрицы.

В течение процесса деформирования форма набираемого утолщения изменяется. Влияние на нее оказывает начальное соотношение L/D и значение фактора трения. В свою очередь, при выборе большего значения начального соотношения, например $L/D = 2,5$, происходит потеря продольной устойчивости стержня. Результаты моделирования на рисунке 4 показывают, что потеря устойчивости образуется при идеальных граничных контактных условиях, т.е. при факторе трения, равном 0 (рисунок 4а). При правильном выборе жесткости упругого элемента за счет действия активных сил трения этот дефект может быть устранен (рисунок 4б). Более детальное исследование по данной проблеме в объеме данной статьи не рассматривается.

По результатам проведенных экспериментов и моделирования при осесимметричном нагружении были выделены следующие формы утолщения (рисунок 5): конус (а), бочка (б) и чашеобразная (в). Данные формы могут меняться и комбинироваться друг с другом в течение процесса деформирования в результате изменения скорости истечения материала из конусообразного очага деформации и изменения скорости перемещения матрицы.

По результатам численного моделирования установлено, что жесткость пружины оказывает существенное влияние на перемещение матрицы. Причем с увеличением жесткости пружины перемещение матрицы на начальном этапе деформирования уменьшается. Для неидеальных условий трения, когда значение фактора трения отлично от 0, кривые жесткости почти совпадают друг с другом (рисунок 6).

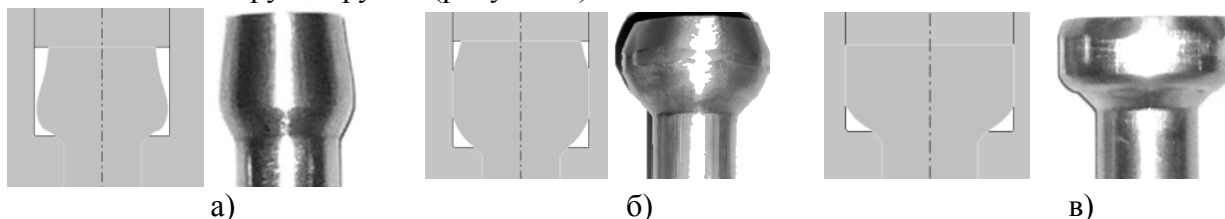


Рисунок 5 – Сравнение экспериментально полученной геометрии утолщения при изменяющихся значениях фактора трения с результатами моделирования

На перемещение матрицы оказывает существенное влияние начальное соотношение L/D и геометрия заходной воронки (высота конуса H_k). Как следует из графиков, представленных на рисунке 6, кривые соответствующие случаю деформирования без трения располагаются выше кривых жесткости, соответствующих случаю деформирования с переменным значением фактора трения (см. таблицы 3 и 4). Причем для пружин с меньшей жесткостью расхождение между указанными выше кривыми увеличивается; при увеличении жесткости пружины влияние возникающих сил трения на перемещение матрицы становится менее существенным и разница между кривыми уменьшается. Наименьшее влияние трения обнаруживается при $L/D = 1$ и $H_k = 4,5$, а наибольшее – при $L/D = 2,5$ и $H_k = 2$. Изменение значения высоты H_k влияет на форму кривых жесткости (см. рисунок 6). При увеличении значения H_k изгиб кривых жесткости уменьшается и кривые могут быть описаны линейной зависимостью

(рисунок 6а и 6б при $L/D = 1,5$ и 2 , соответственно). В предельном случае кривые жесткости становятся параллельными оси абсцисс. Подобное изменение формы кривых обусловлено изменением характера распределения скорости течения металла из зоны деформирования в зону набора утолщения.

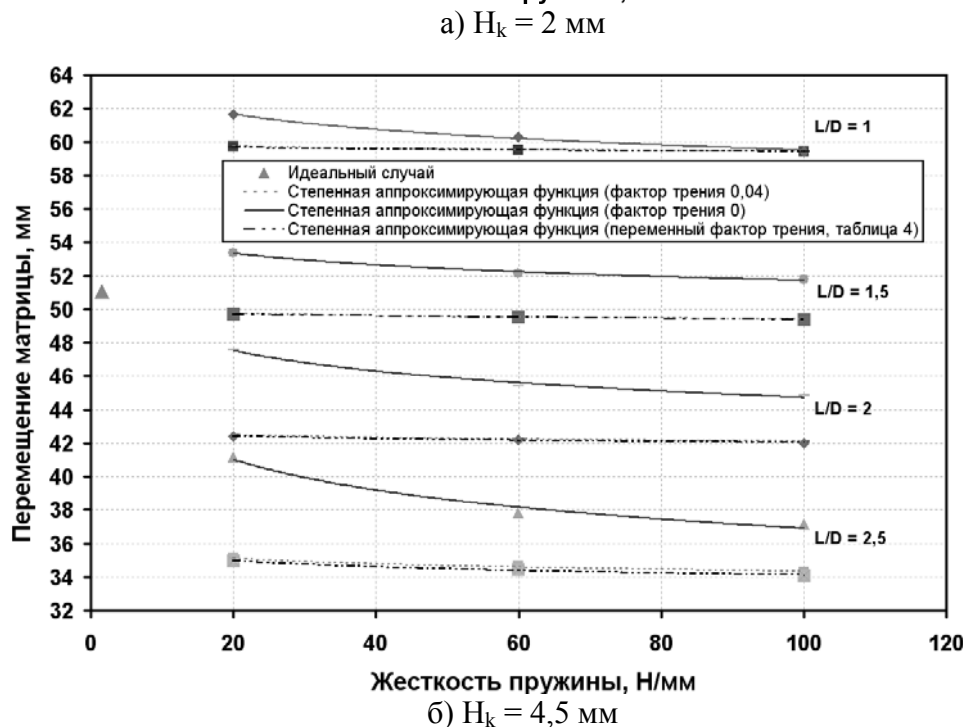
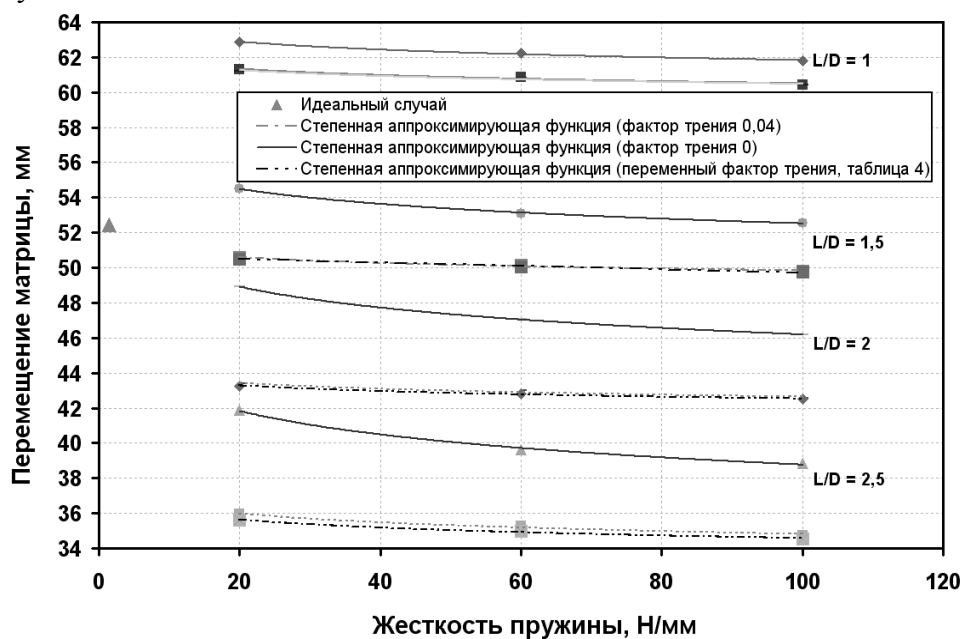


Рисунок 6 – Кривые жесткости для различных начальных условий процесса

Диаграммы, представленные на рисунке 7, иллюстрируют кинематику комбинированного процесса с бегущим очагом деформации для значений $H_k = 2$ и $4,5$ мм при изменяющемся начальном соотношении L/D для трех значений жесткости пружины: 20, 60 и 100 Н/мм. Как следует из рисунка 7а, с увеличением значения начального соотношения L/D и при постоянном перемещении пуансона положение матрицы изменяется существенным образом.

Интенсивное течение металла в радиальном или осевом направлении может приводить к различной форме утолщения (рисунок 2 и 5). Вблизи экспериментальной прямой $y = 0,96x -$

4,8 (см. рисунок 2 и 7) расположены несколько значений перемещения матрицы, соответствующие $L/D = 2$ и 2,5. Это значит, что в ходе процесса деформирования наблюдается увеличение высоты утолщения стержневой части заготовки.

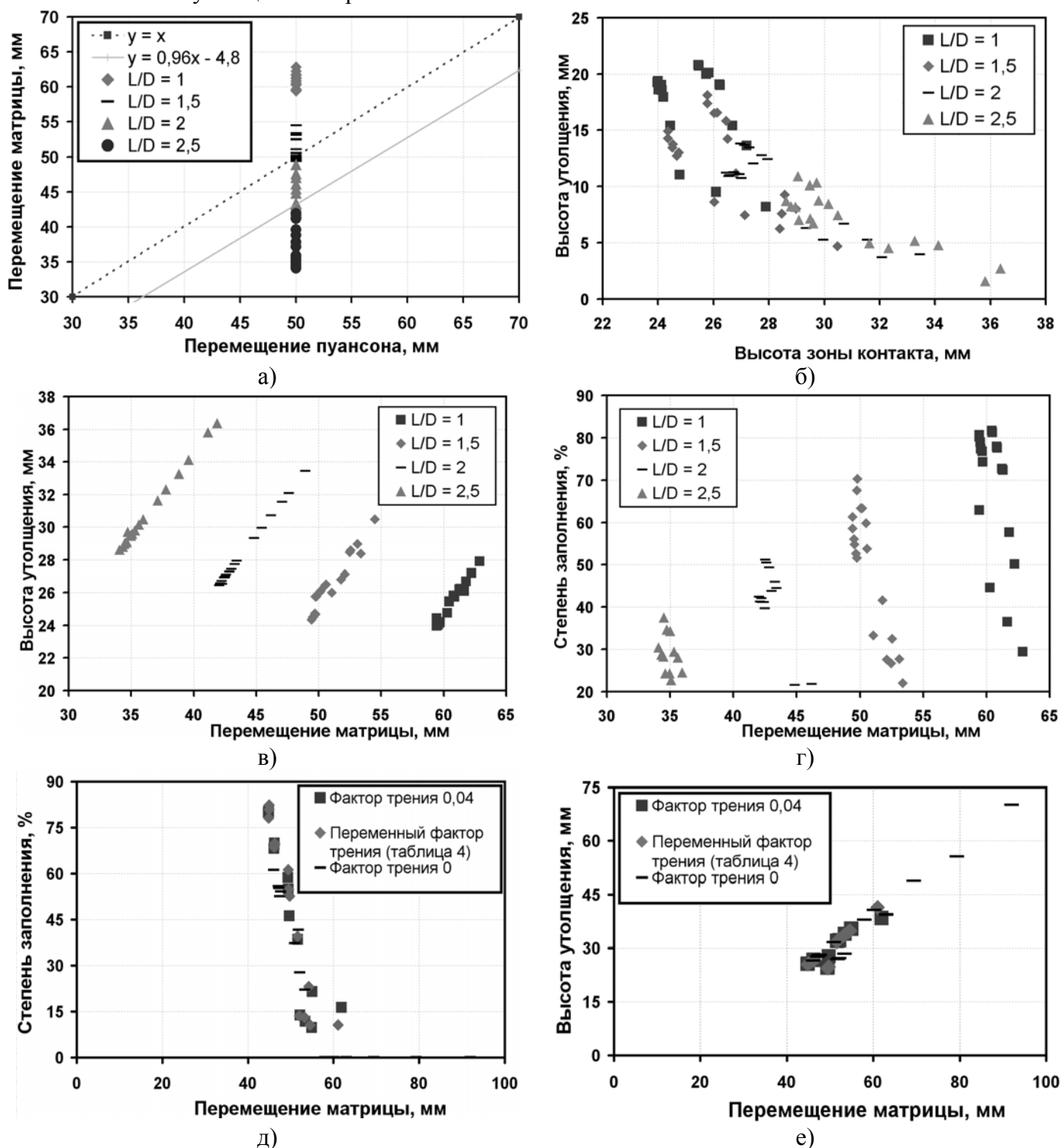


Рисунок 7 – Диаграммы для определения кинематики течения металла

Наибольшее значение высоты утолщения достигается при наименьшем значении начального соотношения L/D (см. рисунок 7б). Однако при увеличении значения L/D наблюдается и увеличение площади контакта утолщения с цилиндрическим участком матрицы (см. рисунок 1б, участок 2). Геометрия точек на данной диаграмме соответствует различным значениям фактора трения в зависимости от значения L/D и высоты конуса H_k .

При начальном соотношении $L/D = 1,5$ и 2 проявляется наибольшая чувствительность деформируемого материала к изменению контактного трения и геометрии заходной воронки. Для указанных значений соотношения L/D в равной степени возможно течение металла в осевом и радиальном направлениях. Степень заполнения для наименьшего L/D является наибольшей, а в случае отсутствия трения и при $H_k = 4,5$ мм либо при $H_k = 2$ мм степень заполнения принимает значения менее 60% (см. рисунок 7г).

При прочих равных условиях выигрыш в степени заполнения (см. рисунок 7г) приводит к набору утолщения меньшей высоты (см. рисунок 7в). При формировании утолщения на заготовке с начальным соотношением $L/D = 2,5$ получаем утолщение максимальной высоты практически за счет отсутствия течения в радиальном направлении и интенсивном накоплении объема материала в осевом направлении (см. рисунок 7в и 7г).

На рисунке 7д и 7е представлены графики, характеризующие изменение перемещения матрицы и высоты утолщения в зависимости от фактора трения для трех значений жесткости пружины. Из этих рисунков следует, что когда значение фактора трения равно 0, перемещение матрицы максимальное (рисунок 7е). Степень заполнения зависит от интенсивности течения металла в радиальном направлении. Она увеличивается с увеличением жесткости пружины, что обусловлено взаимной компенсацией действующих в очаге деформации силы подпора матрицы и силы контактного трения, которые возникают в ходе комбинированного процесса с бегущим очагом деформации (рисунок 7д).

Результатом действия сил контактного трения является изменение температуры заготовки за счет теплового эффекта, обусловленного трением (таблица 5). В идеальных условиях, когда трение отсутствует, средняя температура в образце составляет 35°C при начальном соотношении $L/D = 2$. Переменные значения фактора трения показывают гораздо более высокий уровень температуры при тех же схемах деформирования. Максимальная температура была обнаружена при постоянном значении фактора трения 0,04, при котором среднее значение температуры составляло 120°C ($L/D = 2$).

Таблица 5.

Конечная температура в заготовке в зависимости от условий трения

Фактор трения	Жесткость пружины, Н/мм			L/D
	20	60	100	
0	38°C	34°C	33°C	2
	36°C	31°C	31°C	1
	38°C	33°C	33°C	1,5
	38°C	34°C	34°C	2,5
переменный (таблица 4)	100°C	90°C	95°C	2
	105°C	100°C	105°C	1
	100°C	95°C	95°C	1,5
	95°C	85°C	90°C	2,5
0,04	120°C	120°C	120°C	2
	130°C	130°C	140°C	1
	120°C	120°C	130°C	1,5
	115°C	115°C	115°C	2,5

Помимо высоты конусной зоны матрицы, при исследовании влияния геометрии матричной воронки рассматривался угол ее конуса. Из рисунка 8 видно, что перемещение матрицы уменьшается при уменьшении угла матричной воронки: даже незначительное трение здесь может привести к существенному снижению значения перемещения матрицы. При больших углах воронки влияние трения снижается и при температуре, равной 150°C , кривые, отвечающие деформированию в отсутствии сил трения, соответствуют кривым, полученным при нагружении с различным значением фактора трения.

В соответствии с разработанной математической моделью, представленной в работе [11], было определено, что изменение угла заходной воронки оказывает влияние на силу деформирования при различных величинах фактора трения (рисунок 9). Разность между значением силы деформирования, полученной с учетом математической модели, и значением силы, полученной методом конечных элементов, для фактора трения 0,04 при угле матричной воронки 120° превышает 25%. Причина расхождения результатов связана с тем, что расчетные значения силы были получены только для конической зоны деформирования высотой 5,8 мм. При численном исследовании ее высота составляла 2 мм и 4,5 мм. Высота конической части матрицы в теоретической модели была максимальной, что требовало больших сил деформирования. Для высоты конусной зоны 4,5 мм, факторе трения 0,04 и угле матричной воронки 90° , при средней жесткости пружины 40 Н/мм значение силы деформирования соответствует среднему значению 63 кН, а разница в силовых характеристиках по сравнению с теоретической моделью не превышает 5%.

Таким образом, трение оказывает существенное влияние на течение металла в комбинированном процессе с бегущим очагом деформации. По результатам компьютерного моделирования установлено, что «степень заполнения» (СЗ) изменяется в зависимости от конечного положения матрицы и начального соотношения L/D. Возникающие силы трения изменяют динамику процесса, и геометрия утолщения изменяется в соответствии с графиком, представленном на рисунке 2. Разработанная математическая модель, рассмотренная более подробно в работе [1], хорошо описывает как результаты эксперимента, так и результаты моделирования.

В данной статье представлены результаты работы, выполненной при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного контракта № 14.740.11.1361 «Разработка, исследование и практическое применение критерия разрушения и математической модели сопротивления магниевых сплавов пластической деформации».

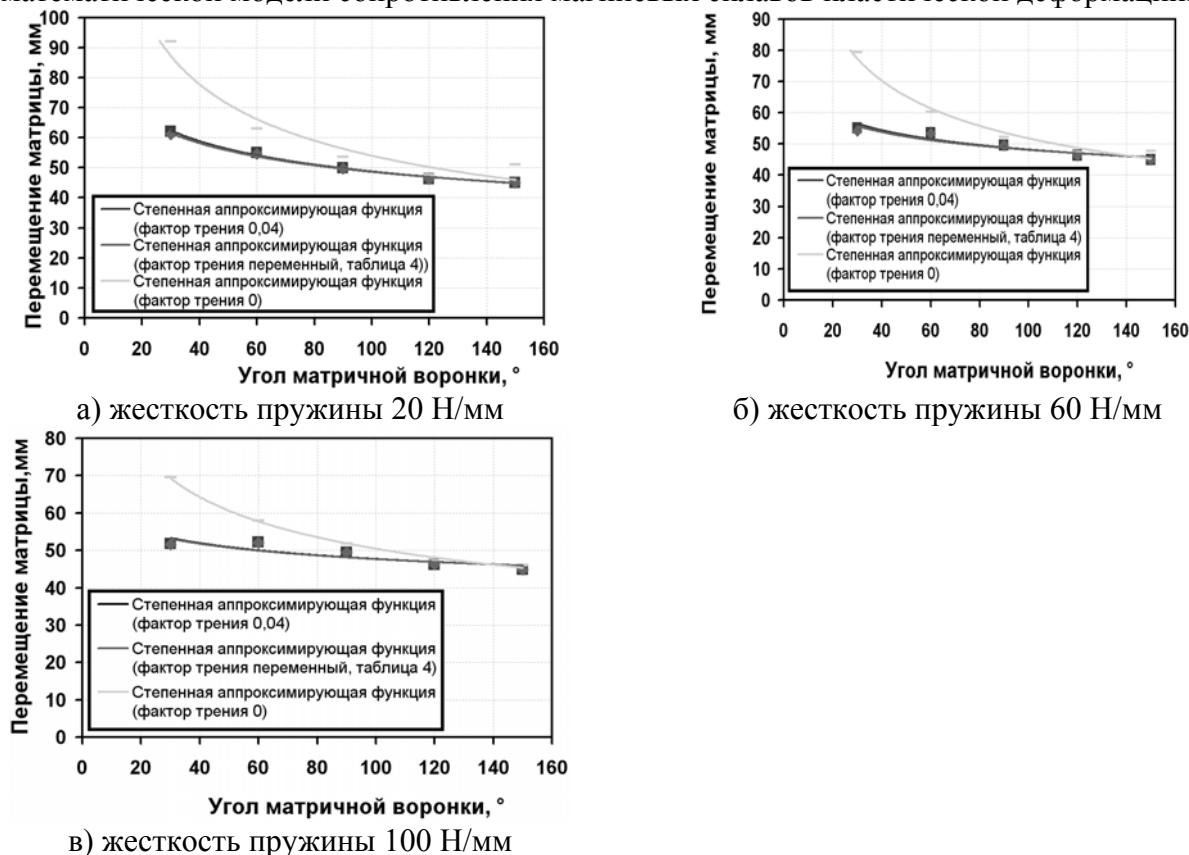


Рисунок 8 – Зависимость перемещения матрицы от угла матричной воронки

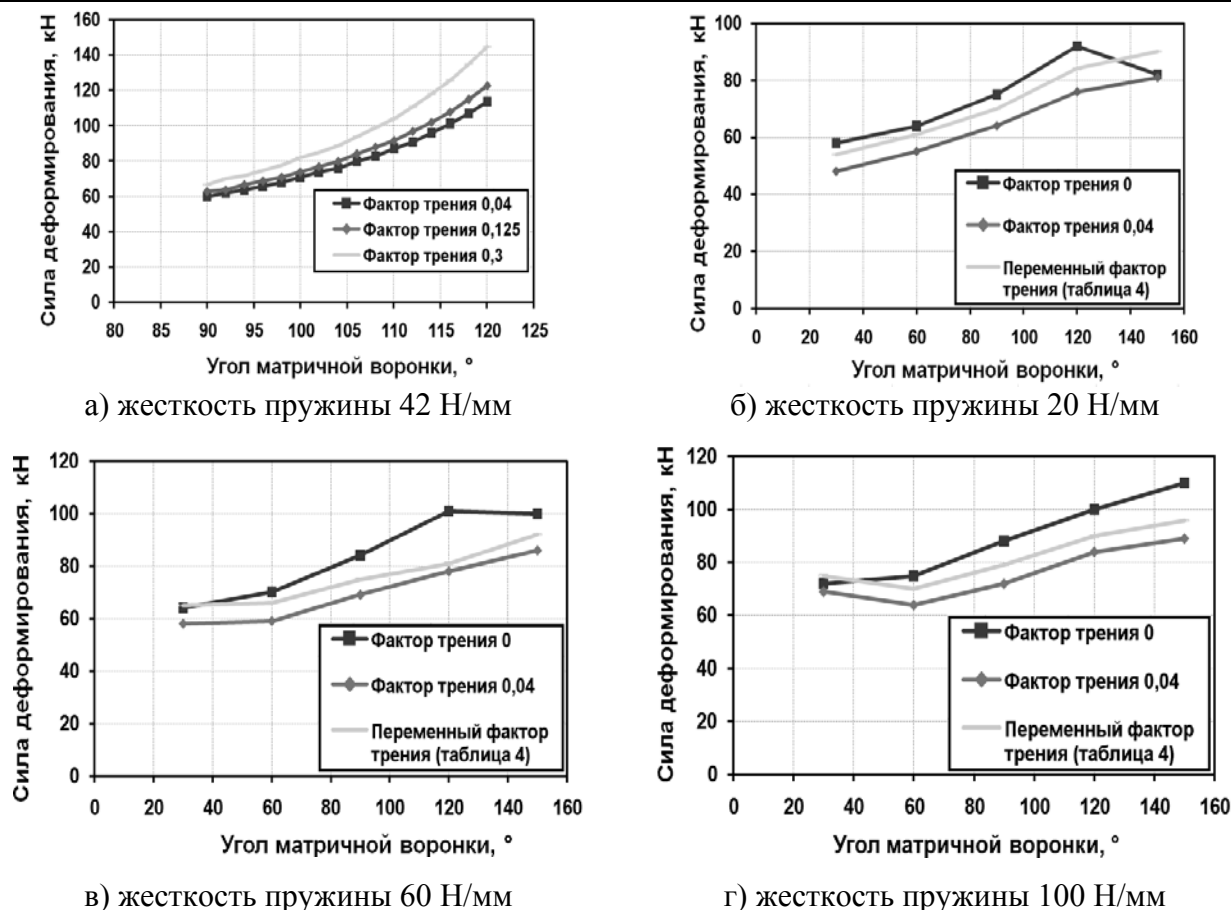


Рисунок 9 – Зависимость силы деформирования от угла матричной воронки

Литература

1. Петров М.А. Повышение эффективности наборных операций объемной штамповки за счет применения комбинированного процесса высадки и поперечного выдавливания с «бегущим» очагом деформации // Дисс. канд.техн. наук – Москва – 2007.
2. Евстифеев В.В. Научное обоснование обобщение и разработка новых технологий холодной объемной штамповки // Дисс. докт. техн. наук – Омск – 1993.
3. Клоке Ф., Кениг В. Производственные процессы // том 4 – Springer Verlag – 2006 – стр. 552 (на немецком).
4. Биллигманн И., Фельдманн Х.-Д. Высадка и прессование. Справочник холодной и горячей обработки металлов давлением цветных и черных металлов // Carl Hanser Verlag – 1973 – стр. 572 (на немецком).
5. Петров П.А., Баст Ю., Петров М.А., Воронков В.И., Шайхулов М.В. Численное сравнение методов для оценки трения в процессах ОМД // Трибология и смазочные вещества – 5/2011 – стр. 10 – 14 (на немецком).
6. Бартц В., Барнерт Л. Трибология и смазка в объемной штамповке // Experten Verlag – 2004 – стр. 345 (на немецком).
7. Калпин Ю.Г., Петров М.А., Петров П.А. Исследование кинематики процесса радиального выдавливания с «бегущим» очагом деформации. // Известия МГТУ «МАМИ» – 2007 – стр. 164-168.
8. Руководство пользователя QForm-2D/3D® (КванторСофт®).
9. Калпин Ю.Г., Петров М.А., Петров П.А. Экспериментальное и численное исследование поперечного выдавливания деталей типа «стержень с утолщением» // Computer Methods in Materials Science – том 7 – №3 – 2007 – стр. 347 – 351 (на английском).