

## **Разработка технологического процесса формообразования резьбы методом пластического деформирования с использованием программного комплекса DEFORM**

Езжев А.С, Лёгких А.Н, Сидоров А.А.  
МГТУ им. Н.Э.Баумана, каф. Обработки Металлов Давлением

В настоящее время для получения резьбы широко используется технология нарезания ее механической обработкой. Резьба, полученная таким способом, имеет низкие механические характеристики, сопровождается отходом металла в стружку, а процесс её изготовления является достаточно трудоёмким. В этой связи для ответственных деталей, в которых качество и прочность резьбы определяют надёжность и работоспособность детали в целом, предпочтительно изготавливать резьбу методом обработки давлением.

Резьба, полученная пластическим деформированием, имеет повышенные механические характеристики, высокую износостойкость, а отсутствие перерезывания волокон и концентраторов напряжений повышает надёжность и работоспособность деталей.

Примером таких деталей, в которых резьба является наиболее ответственным элементом конструкции в целом, являются переводники насосно-компрессорных труб (НКТ) (рис. 1). Переводники насосно-компрессорных труб (НКТ) служат для соединения большого числа этих труб в колонну, опускаемую в скважину и имеющую длину от одного до десяти километров. Вес такой колонны достигает 30-40 тонн, и нагрузка на точки сочленения труб (соединительные узлы, переводники) такова, что от надёжности именно этих соединительных узлов напрямую зависит надёжность работы всей многокилометровой колонны.

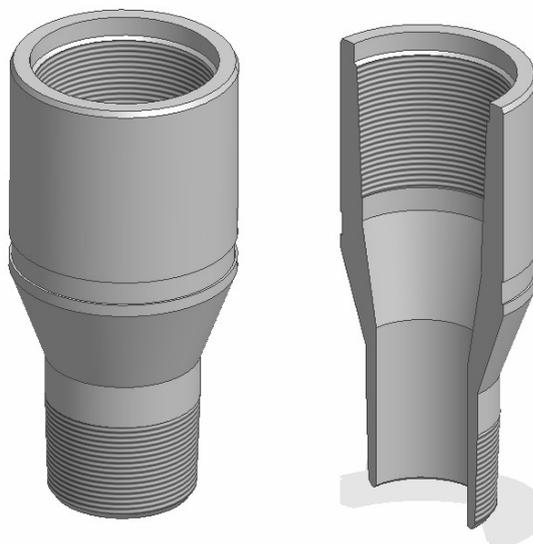


Рис. 1 Переводник насосно-компрессорных труб (целая деталь и осевой разрез)

Разрушение некачественно сделанного переводника в составе полутора - двухкилометрового лифта, спущенного в нефтяную или газовую скважину, влечет за собой значительные затраты на производство аварийных работ, которые могут составлять от одного до нескольких млн. рублей. При этом вся колонна НКТ, стоимостью от одного миллиона рублей подлежит списанию. Поэтому переводники

изготавливаются из дорогостоящих качественных легированных сталей, обычно сталь 40ХН. Опыт эксплуатации показал, что слабым местом переводников является присоединительная резьба. Наличие двух участков с нарезанной внешней и внутренней резьбой значительно снижает механические характеристики изделия и сводит на нет все преимущества штампованного переводника.

Попытки изготовить резьбу на переводниках на практике методом накатки не дали положительных результатов ввиду особенностей конструкции переводников - большие диаметры при малой толщине стенки. Под действием значительных сил накатки стенка переводника теряет устойчивость и деформируется. Проведённое моделирование также это подтверждает.

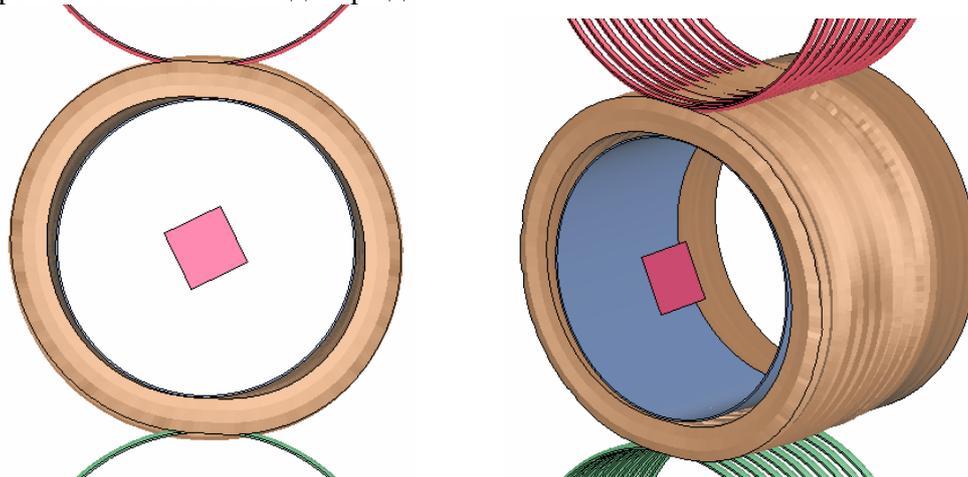


Рис. 2 Потеря устойчивости стенки переводника при накатке резьбы с использованием оправки

Отсюда возникла задача поиска других, альтернативных накатке, способов формообразования резьбы пластическим деформированием. В представленной работе разработан новый (альтернативный накатке) технологический процесс формообразования резьбы методом пластического деформирования для наружной и внутренней резьбы.

Нарезанная резьба имеет целый ряд недостатков, таких как:

- Склонность к образованию задиrow в процессе свинчивания – развинчивания;
- Перерезание волокон металла в процессе изготовления, и как следствие, образование концентраторов напряжения;
- Малый срок службы (не более 6 кратного использования);
- Высокая трудоемкость процесса;
- Необходимость в использовании сложного станочного парка и достаточно большой номенклатуры быстроизнашивающегося режущего инструмента;
- Большая, по сравнению со штамповкой, длительность производственного цикла.

Предлагаемая технология формирования резьбы обработкой давлением исключает перечисленные недостатки и позволяет резко повысить производительность труда и снизить трудозатраты.

На стадии НИР были проведены теоретические и экспериментальные исследования, а также математическое моделирование в программном комплексе DEFORM-2D. Объектом исследований был принят реальный переводник П73/60 с конической резьбой диаметром 60 мм и профилем по ГОСТ 633-80 на «Насосно-компрессорные трубы и муфты к ним» (рис. 3) из материала сталь 40ХН.

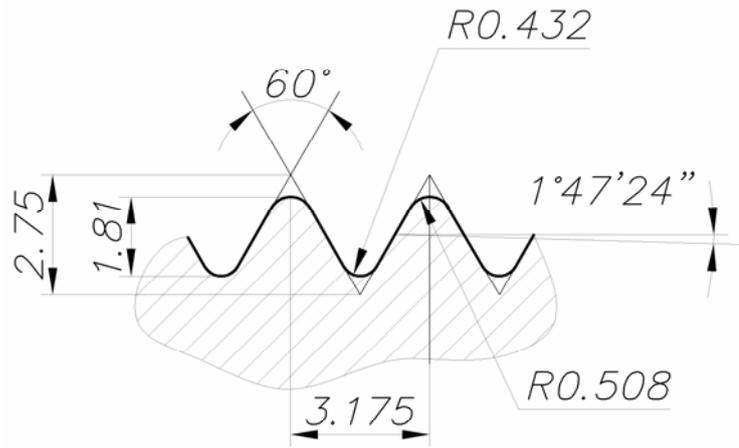


Рис. 3 Профиль резьбы по ГОСТ 633-80

При необходимости, после извлечения детали из штампа может проводиться калибровка резьбы, путем обкатки профилированным роликом и финишная бесконтактная обработка по методу БУФО (бесконтактная ультразвуковая финишная обработка) с нанесением антизадирного смазывающего графитового нанопокртия.

Сущность процесса штамповки наружной резьбы на ниппельном конце переводника состоит в следующем (см. рис. 4)

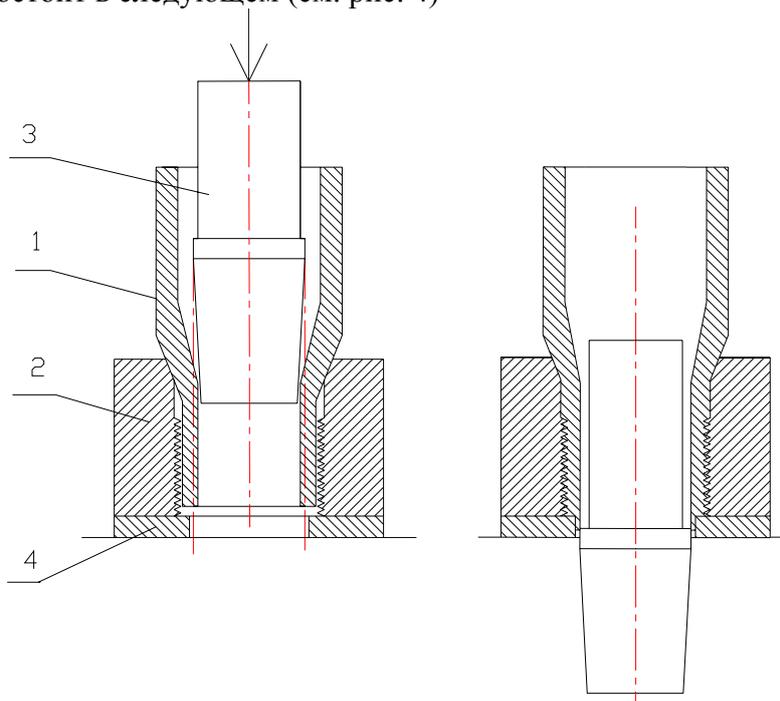


Рис. 4 Схема штамповки резьбы на ниппельном конце переводника

Отштампованный корпус 1 переводника устанавливается в специальный штамп с резьбовой матрицей 2 так, что его ниппельная часть размещается внутри этой матрицы с минимальным зазором. Конический пуансон 3 имеет цилиндрический калибрующий пояс, диаметр которого больше внутреннего диаметра отверстия ниппельной части переводника. Поэтому при движении пуансона вниз происходит раздача стенки заготовки, и деформируемый металл заполняет канавки профиля резьбы матрицы. Иначе говоря, в результате пластической деформации стенки ниппельной части переводника на ней «отпечатывается» требуемый профиль резьбы.

На рис.4 слева показано исходное положение заготовки и инструмента, справа – положение после выполнения операции. Подпорное кольцо 4 препятствует свободному вытеканию металла в осевом направлении и образует с поверхностью пуансона кольцевую щель переменного сечения, уменьшающегося по мере опускания пуансона.

Образующийся торцевой заусенец, с одной стороны, создает сопротивление, способствующее лучшему заполнению канавок резьбы, с другой стороны - служит компенсатором избытка металла.

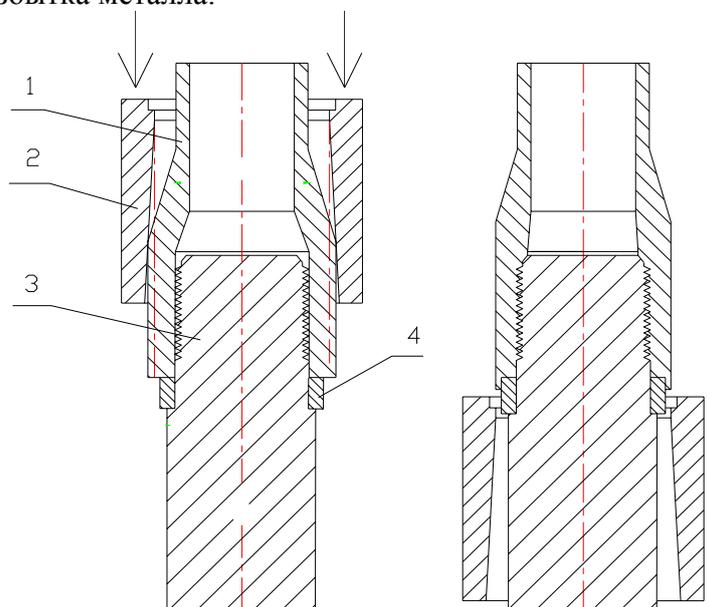


Рис.5 Схема штамповки резьбы на муфтовом конце переводника

Схема формообразования внутренней резьбы на муфтовой части переводника показана на рис.5, слева – исходное положение заготовки и инструмента, справа – конечное положение после выполнения операции

Корпус переводника 1 устанавливается на резьбовую оправку 3 с минимальным зазором между внутренним отверстием заготовки и наружным диаметром резьбовой оправки. Коническая матрица 2 имеет диаметр цилиндрического калибрующего пояска меньше, чем наружный диаметр заготовки. Поэтому при движении матрицы вниз происходит обжим стенки муфтовой части и деформируемый металл заполняет канавки профиля резьбы оправки, другими словами, на внутренней поверхности заготовки «отпечатывается» требуемый профиль резьбы. Подпорное кольцо 4 препятствует свободному течению металла вниз и образует с конической поверхностью матрицы переменный кольцевой зазор, в который вытекает заусенец, компенсирующий избыток металла.

### **Моделирование процессов формообразования наружной и внутренней резьбы**

Моделирование осуществлялось в программном комплексе Deform 2D v. 9.0 со следующими допущениями:

- принималось, что трение на всей поверхности контакта заготовки с инструментом подчиняется закону сухого трения Кулона с постоянным коэффициентом трения;
- рассматривался изотермический процесс деформации с механическими характеристиками материалов, не зависящими от температуры;
- при исследовании плоской задачи принято, что резьба является комбинацией концентрических поверхностей выступов и впадин, а не винтовой поверхностью

Моделирование проводилось в основном для алюминия, поскольку в дальнейшем планировалось проводить эксперимент на алюминии для изучения процесса и сравнения с результатами математического моделирования. Для базовых вариантов проведено моделирование с параметрами стали 40ХН.

### Моделирование процесса формообразования наружной резьбы

Для наружной, ниппельной резьбы, проводилось исследование влияние на параметры процесса и заполняемость профиля резьбы следующих факторов:

- размеров стенки заготовки
- угла конуса пуансона
- формы пуансона
- торцевого подпора заготовки

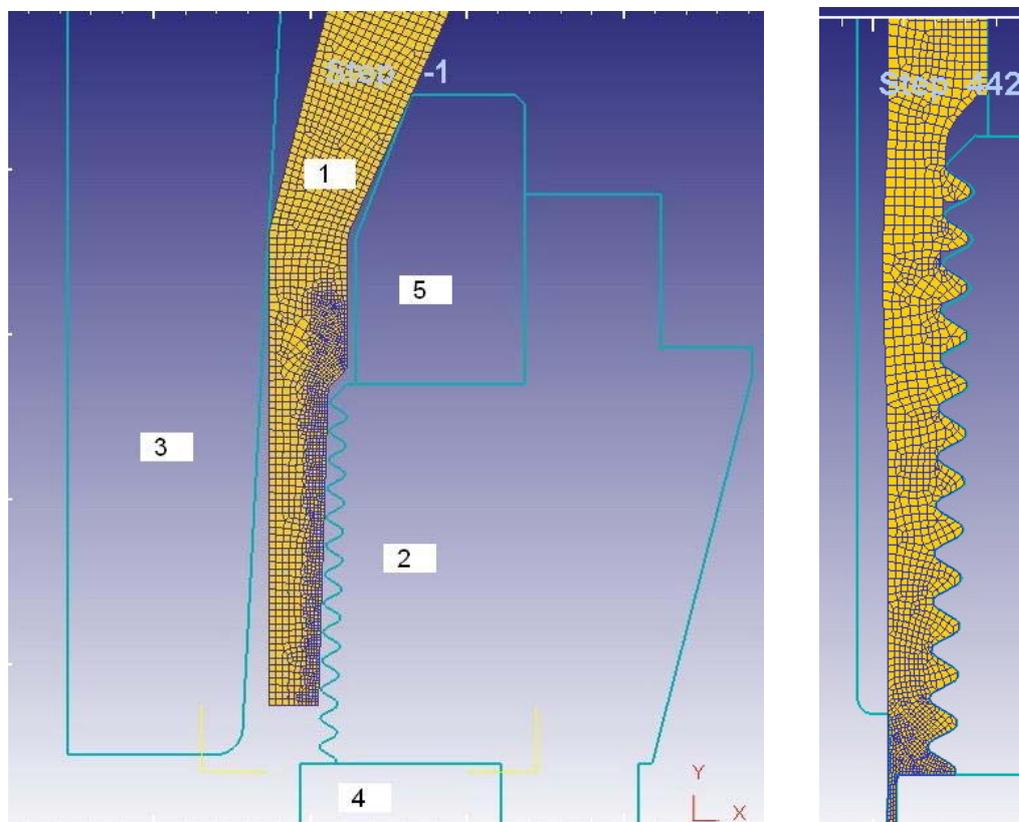


Рис. 6 Начало процесса формообразования наружной резьбы(слева) и конец процесса (справа), 1-заготовка,2-матрица, 3-пуансон, 4-подпор, 5-поддерживающее кольцо.

Моделирование процесса показало, что при формообразовании резьбы на ниппеле кроме радиального течения металла в профильные канавки резьбы имеет место и осевое течение в двух направлениях: в сторону движения пуансона (попутное течение) и против движения пуансона (встречное движение). Попутное течение может быть ограничено установкой на резьбовой матрице торцевого подпора или свободным (при отсутствии подпора). Встречное течение ограничивается только сопротивлением металла корпусной части заготовки.

На начальном этапе деформирования происходит раздача цилиндрического участка заготовки с заполнением зазора между заготовкой и стенкой матрицы.

После полного заполнения зазора при дальнейшем движении пуансона начинается формообразование резьбы с последовательным заполнением витков резьбы, начиная от верхнего. При этом в месте перехода от цилиндрической части к резьбе образуется зона, в которой витки резьбы полностью заполнены (при достаточном объёме стенки заготовки), будем называть её «застойная зона». Относительно неё металл течет как в попутно - радиальном направлении, заполняя профиль резьбы и увеличивая высоту ниппельной части, так и во встречном направлении, в корпус заготовки. На рис. 6 (справа) видно искажение формы верхних витков и удлинение верхней части заготовки. Это как раз связано с вытеканием избытка металла во встречном направлении.

По мере продвижения пуансона происходит последовательное заполнение витков и, соответственно, увеличение высоты застойной зоны, где деформация уже закончилась. При этом металлу уже труднее течь во встречном направлении за счёт увеличения сопротивления, происходит более интенсивное течение металла в попутном направлении.

Деформирование заготовки, имеющей длину, равную длине резьбовой части матрицы не целесообразно, поскольку при толщине стенки, достаточной для заполнения верхних витков, получается очень большой заусенец.

В моделировании по исследованию влияния формы пуансона, кроме конического пуансона использовался пуансон с кольцевыми канавками, который представляет собой ступенчатый конический пуансон, смысл которого в том, что деформация происходит циклически коническими поясками, что позволяет снизить силу деформирования. Результаты моделирования приведены в таблице 1.

#### Моделирование процесса формообразования внутренней резьбы

Для внутренней (муфтовой) резьбы проводилось исследование влияние на параметры процесса и заполняемость профиля резьбы только объёма стенки заготовки.

При этом использовались две разные схемы: с жёстким пуансоном (рис. 7) и плавающим пуансоном (рис.8)

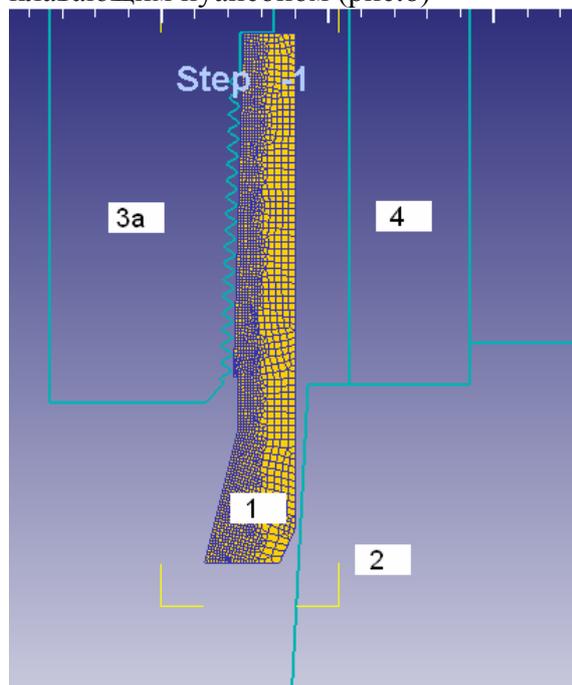


Рис. 7

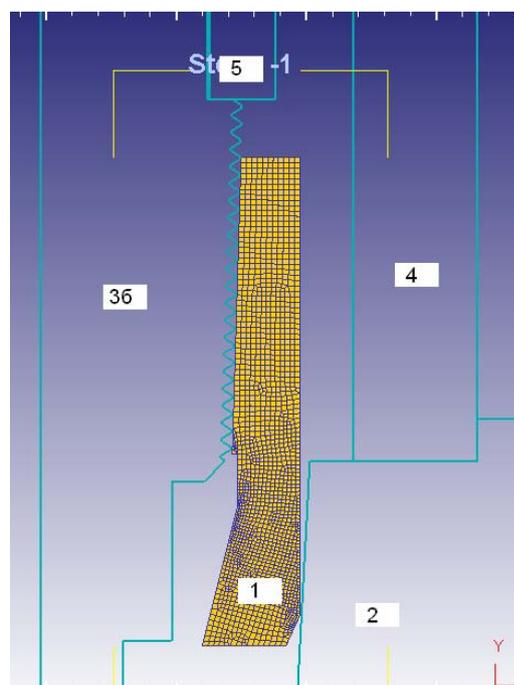


рис. 8

Обозначения на рисунке: 1- заготовка, 2 - коническая обжимная матрица, 3а - жёсткий пуансон, 3б - плавающий пуансон, 4- направляющий стакан, 5- нажимная втулка. Угол конусности матрицы 3°.

Принципиальное отличие в том, что плавающий пуансон может увлекаться за витки металлом заготовки, теряя контакт с нажимной втулкой, в этой связи он имеет более благоприятные условия работы, так как меньше растягивающие напряжения.

а) *Схема с жёстким пуансоном*

При деформировании заготовки с  $\varnothing=93\text{мм}$  уже образуется значительный заусенец, а заполнение профиля резьбы очень плохое (см. рис.9а) При заготовке  $\varnothing=94\text{мм}$  заусенец ещё больше (рис.9б), заполнение верхних витков хорошее, а внизу видно недозаполнение (рис. 9в). При деформировании заготовки с  $\varnothing=95\text{мм}$  образуется огромный заусенец (рис. 9г), излишки металла привели к тому, что нижние витки не успев заполниться, уже начали вытекать вниз с металлом, приобретая искажённую форму (рис. 9д).

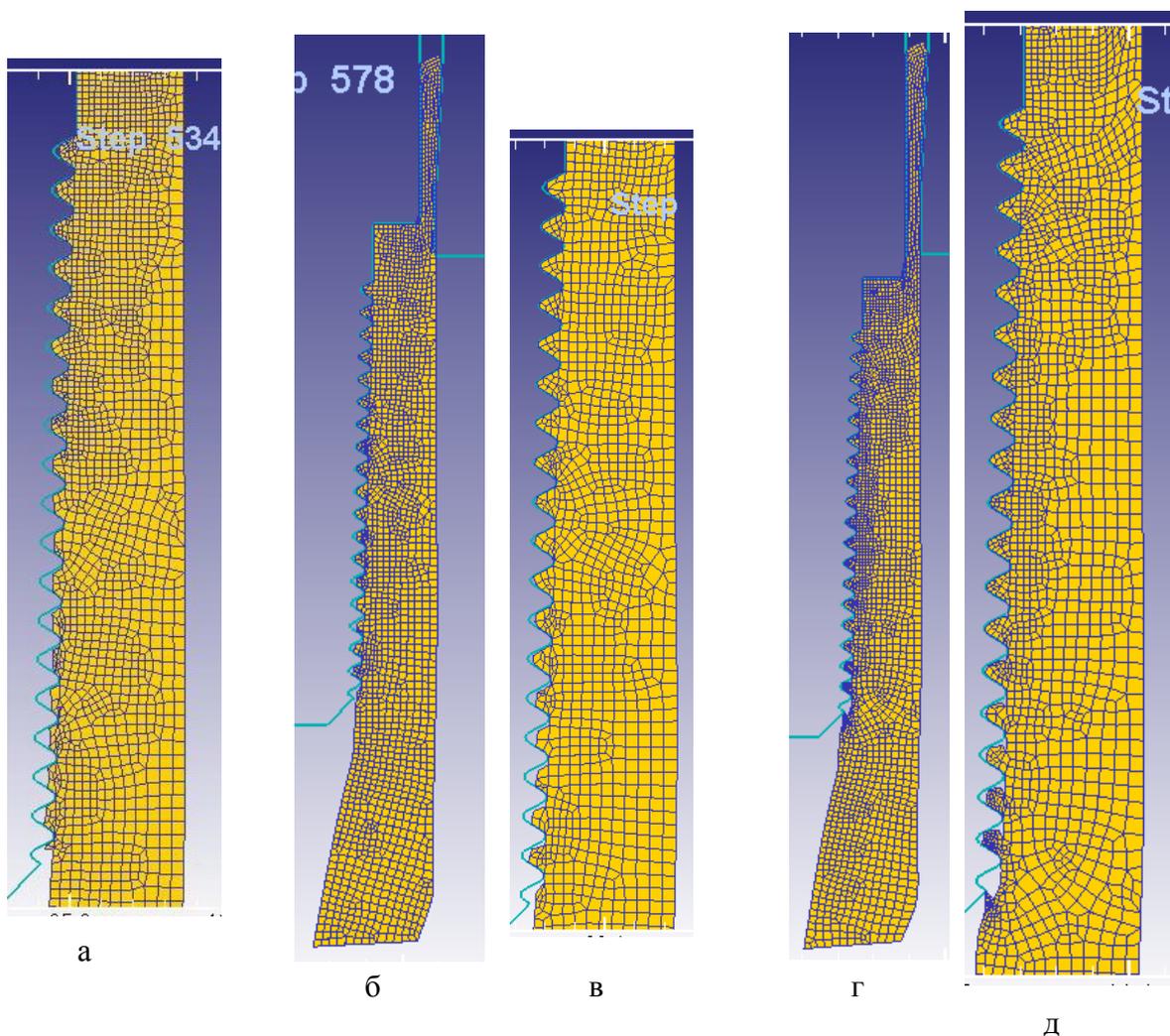
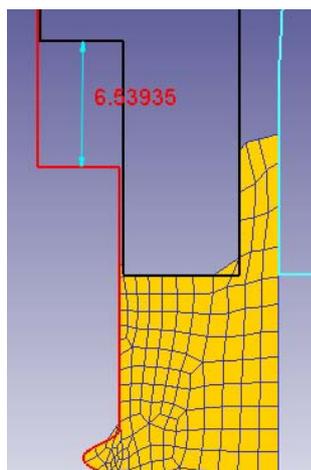


Рис.9

## б) Схема с плавающим пуансоном



Процесс заполнения резьбовой полости протекает точно также, как в схеме с жёстким пуансоном. Раскрытие стыка в результате моделирования составляло до 6,5 мм (см. рис.10)

Рис. 10

Принципиальных отличий по заполнению профиля от схемы с жёстким пуансоном нет, поэтому рисунки здесь не приводятся. При заготовке с  $\varnothing=94$ мм наблюдается недозаполнение профиля резьбы, что соответствует примерно рис. 9в. При деформировании заготовки с  $\varnothing=95$ мм нижние витки не полностью заполняются и при этом геометрически искажаются за счёт попутно течения лишнего металла. А при деформировании заготовки с  $\varnothing=96$ мм в процессе деформирования на какой-то стадии происходит полное заполнение всех витков, но к концу деформирования примерно 6 нижних витков имеют искажения. Наиболее сильные искажения имеют самые нижние витки резьбы. Таким образом возникает проблема нахождения дополнительных условий для того, чтобы все витки заполнялись при минимальной толщине стенки, во избежание осевого течения металла на последней стадии деформирования.

Результаты моделирования для муфтовой резьбы приведены в таблице 3.

## Экперимент

### Штамповка наружной резьбы

Эксперимент проводился на алюминии марки АД1, оснастка была изготовлена из недорогой инструментальной стали Х12М, не позволяющей проводить эксперимент на стали 40ХН.

Работа с алюминием в обработке давлением сопровождается известными трудностями, связанными с т.н. «прилипанием» или «схватыванием» алюминия с металлом, с которым он соприкасается, при сдирании с алюминия покрывающей его оксидной плёнки. В ходе эксперимента наблюдались такие случаи, особенно при штамповке пуансонами с винтовыми и кольцевыми канавками. Причём этот фактор не предсказуем и численно неопределим, поэтому силы деформирования резко отличаются, что делает невозможным оценить реальные силы деформирования. Поэтому для работы с алюминием рекомендуется применять спиртосодержащие смазки, в данном же эксперименте использовалась сподручная смазка для холодного деформирования из животного жира на основе дисульфида молибдена. Силовые характеристики по упомянутой причине не приводятся, тем более что целью работы ставилось исследование течения металла при данных технологических процессах и факторов, влияющих на него.

Геометрические формы штамповок и характер течения металла хорошо совпадает с результатами, полученными в ходе эксперимента, например утяжка верхних витков, рис. 11.

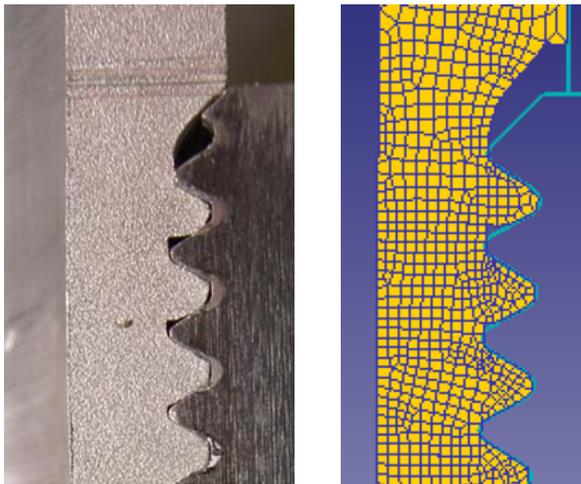
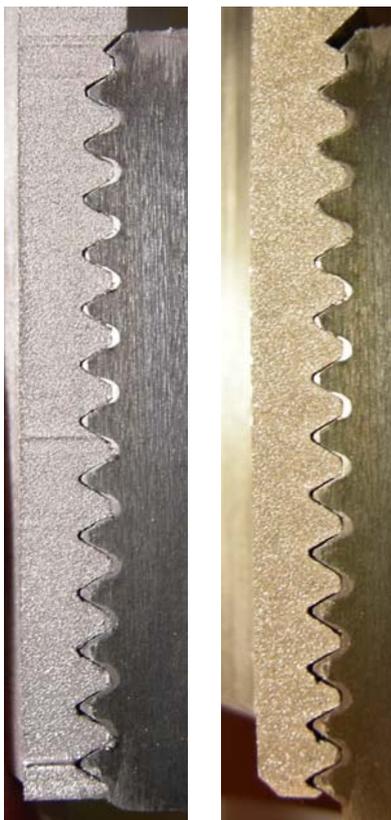


Рис. 11 Утяжка верхних витков при штамповке

В ходе эксперимента, кроме упомянутого выше пуансона с кольцевыми канавками, использовался также винтовой пуансон. Винтовой пуансон представляет собой конический пуансон с двузаходной винтовой линией с целью снизить силу деформирования и получить некоторую раскатку металла.



На рис. 12 представлены в разрезе заготовки с матрицей, деформированные винтовым пуансоном с углом конуса  $\alpha = 2^{\circ}$ . Слева заготовка с размерами  $d = 44$  мм  $h = 35,3$  мм, справа -  $d = 45$  мм  $h = 36,6$  мм. На правом рисунке видно небольшое отставание заготовки внизу от матрицы вследствие упругой разгрузки. Результаты эксперимента по штамповке ниппельной резьбы представлены в таблице 2. При деформировании винтовым пуансоном отмечается наилучшее заполнение даже при небольшой толщине стенки, и при этом отсутствуют искажения витков вследствие утяжки.

Рис. 12 Наилучшее полученное заполнение профиля резьбы

Извлечение штампованной детали производилось вывинчиванием с помощью специальных приспособлений под прессом. Приспособления представляют собой подобие больших ключей, один ключ фиксирует матрицу (или пуансон для муфтовой резьбы), а второй зажимает деталь за цилиндрическую часть. Поскольку резьба коническая, то главная задача преодолеть усилие страгивания с места, после чего момент вывинчивания существенно падает. Максимальный момент вывинчивания для ниппельной резьбы составил порядка 6250Нм. Для стальной детали момент

вывинчивания предположительно меньше, в связи с вышеупомянутой особенностью алюминия.

### Штамповка внутренней резьбы

Результатов экспериментального исследования с жестким пуансоном почти нет. После неудачного опыта с малопластичным твёрдым алюминием марки АМг6 он сломался в месте перехода цилиндрических частей разного диаметра. А конструкция плавающего пуансона была разборная и не предусматривала вывинчивания. Пуансон извлекался из штамповки посредством его разбора, в этой связи момент вывинчивания для муфтовой резьбы неизвестен.

В ходе эксперимента не было получено полное заполнение профиля даже в верхней части заготовки. На рисунке 13а представлены в разрезе пуансон со штампованной заготовкой  $\varnothing=95\text{мм}$  из материала АД1. На рис. 13б - штампованная заготовка  $\varnothing=95\text{мм}$  из материала АД1, видно два срезанных нижних витка вследствие их сильного искажения в результате утяжки.



а



б

рис. 13

**Таблица1 Результаты моделирования для наружной резьбы**

<i>Влияние угла конуса пуансона, заготовка d=44мм, h=35мм с подпором</i>				
	$\alpha = 2^\circ$	$\alpha = 3^\circ$	$\alpha = 5^\circ$	$\alpha = 3^\circ$ сталь
Степ. заполн., %	100	100	100	100
искажения	средние	средние	средние	Ниже средних
<i>Влияние торцевого подпора, заготовка d=44мм, h=35мм, конич. пуансон <math>\alpha = 3^\circ</math></i>				
	без подпора		С подпором	
Степ. заполн., %	100		100	
искажения	слабые		средние	
<i>Влияние формы пуансона, заготовка d=44мм, h=35мм с подпором</i>				
	Конич. $\alpha = 2^\circ$	С кольц. кан. $\alpha = 2^\circ$	Конич. $\alpha = 3^\circ$	С кольц. кан. $\alpha = 3^\circ$
Степ. заполн., %	100	100	100	100
искажения	средние	слабые	средние	слабые
<i>Влияние размеров стенки заготовки, с подпором</i>				
	d = 47мм, h=42мм	d = 46мм, h=42мм	d = 45мм, h=42мм	d = 40мм, h=26 мм,
Степ. заполн., %	50-100	90-100	100	100
искажения	отсутствуют	средние	средние	сильные

**Таблица2 Результаты эксперимента для наружной резьбы**

<i>Влияние угла конуса пуансона, заготовка d=45мм, h=37мм с подпором</i>				
	$\alpha = 2^\circ$ с кольц. канавками	$\alpha = 3^\circ$ конич. пуансон	$\alpha = 5^\circ$ конич. пуансон	
Степ. заполн.,%	60-100	90-100	70-100	
искажения	отсутствуют	средние	отсутствуют	
<i>Влияние торцевого подпора, заготовка d=45мм, h=35мм, конич. пуансон <math>\alpha = 3^\circ</math></i>				
	без подпора		С подпором	
Степ. заполн.,%	80-100		90-100	
искажения	средние		средние	
<i>Влияние формы пуансона, заготовка d=45мм, h=36,6 мм</i>				
	Пуансон с кольцевыми канавками $\alpha = 2^\circ$		Пуансон с винтовыми канавками $\alpha = 2^\circ$	
Степ. заполн.,%	70-100		100	
искажения	отсутствуют		отсутствуют	
<i>Влияние размеров стенки заготовки</i>				
	d = 46мм, h=42мм конич. $\alpha = 3^\circ$	d = 45,8 мм, h=42мм винт. $\alpha = 2^\circ$	d = 45мм, h=36,6мм винт. $\alpha = 2^\circ$	d = 44мм, h=35,3мм винтовой $\alpha = 2^\circ$
Степ. заполн.,%	70-100	90-100	100	100
искажения	отсутствуют	отсутствуют	отсутствуют	отсутствуют

Пояснения к таблице: Степ. заполн.,% - это степень заполнения металлом витков резьбы от наихудшего к наилучшему, определённое приблизительно, без измерительного инструмента

**Таблица 3 Результаты моделирования для внутренней резьбы**

	<i>Схема с жестким пуансоном</i>			
Размер загот.	Ø=93мм	Ø=94мм	Ø=95мм	
Степ. заполн.,%	50-90	80-100	90-100	
искажения	отсутствуют	слабые	сильные	
	<i>Схема с плавающим пуансоном</i>			
Размер загот.	Ø=94мм	Ø=95мм	Ø=96мм	Ø=95мм сталь
Степ. заполн.,%	80-100	100	100	100
искажения	слабые	сильные	сильные	сильные

**Таблица 4 Результаты эксперимента для внутренней резьбы**

	<i>Схема с плавающим пуансоном</i>			
материал	АМг6	АД1	АД1	АД1
	Ø=93,9мм	Ø=95мм	Ø=95,5мм	Ø=96мм
Степ. заполн.,%	40-70	70-80	70-80	70-90
искажения	слабые	слабые	средние	сильные

## **Выводы и рекомендации по штамповке резьбы**

### *При штамповке наружной резьбы на ниппеле переводника*

1. Установлено, что деформирование заготовки начинается с раздачи цилиндрической части ниппеля и заполнения зазора, с которым эта часть ниппеля вставлена в матрицу. Только после этого происходит формование резьбы, которое начинается с верхних витков и распространяется вниз по мере опускания пуансона.

2. Заполненные канавки резьбы образуют застойную зону и, если деформация стенки в окрестностях этой зоны продолжается, металл вытесняется из слоев, приконтактных к пуансону, и обтекает застойную зону сформировавшихся витков, перемещаясь как в попутном (вниз), так и во встречном (вверх) направлениях.

3. Попутное течение металла способствует формированию нижележащих витков резьбы и увеличивает высоту ниппельной части (при отсутствии торцевого подпора). Встречное течение обтекает уже сформированные витки, увеличивает сопротивление деформированию, общую высоту заготовки, а главное, искажает верхние витки заготовки за счёт «утяжки» уже сформированных витков, вытягивая их из полостей резьбы.

4. Для уменьшения влияния встречного течения металла, в конструкции технологической оснастки необходимо предусматривать верхний прижим заготовки.

5. Уменьшение угла конуса пуансона улучшает заполняемость резьбы за счёт большего радиального течения, но приводит к увеличению искажения витков.

Наличие торцевого подпора обеспечивает заполняемость нижних витков резьбы и точность высоты ниппельной части заготовки. В конструкции технологической оснастки желательно иметь набор колец, формирующих торцевой подпор, для подбора величины торцевого заусенца.

6. Эксперимент показал, что пуансон с винтовыми канавками обеспечивает лучшее заполнение витков резьбы. Полное заполнение происходит при толщине стенки меньшей, чем требуется для других пуансонов, при этом искажения верхних витков вследствие утяжки отсутствуют или незаметны.

7. Моделирование процесса деформирования пуансоном с кольцевыми канавками и эксперимент показали, что степень искажения витков резьбы вследствие утяжки меньше, чем при деформировании обычными коническими пуансонами.

8. Оптимальной формой ниппельного конца заготовки под штамповку наружной резьбы, обеспечивающей заполняемость профиля при минимальном объеме деформируемой части является форма с высотой, на 5 - 7 мм меньшей высоты резьбы при соответствующем увеличении толщины стенки. Другими словами, оптимальным решением является минимальный объем при увеличенной толщине и укороченной высоте стенки ниппельной части заготовки.

### ***При штамповке внутренней резьбы на муфте переводника***

9. Формирование резьбы начинается с заполнения нижних витков резьбового пуансона и распространяется вверх по мере его перемещения относительно обжимной матрицы.

10. Штамповка с передачей деформирующей силы на переводник через пуансон с буртом, ограничивающим возможность двустороннего продольного течения металла, приводит к созданию значительных осевых растягивающих напряжений на пуансоне в результате интенсивного попутного течения металла и его разрушению (поперечному разрыву)

11. Штамповка с передачей деформирующей силы непосредственно на стенку переводника без воздействия на пуансон (схема с плавающим пуансоном) снижает растягивающие напряжения в пуансоне, но приводит к тому, что встречное течение металла увеличивает высоту стенки муфтовой части, приподнимая ее торец относительно резьбового пуансона.

12. Увеличение толщины стенки муфтовой части заготовки улучшает заполняемость профиля резьбы, однако при этом приводит к искажению нижних витков резьбы в результате увеличения избыточного объема металла, вытекающего в направлении ниппельной части заготовки и, как следствие, к срезу этих витков. Поэтому требуются дополнительные условия для улучшения заполняемости профиля резьбы и отсутствия искажения витков, например изменение формы заготовки, угла конусности обжимной матрицы, дополнительного подпора и т.п.

13. В целом проведенные эксперименты показали возможность формирования наружной и внутренней резьбы, но являются недостаточными для установления оптимальных параметров процесса, геометрии заготовки и инструмента, требований к технологической оснастке. Это связано с очень малым количеством заготовок, имевшихся в распоряжении исследователей, недостатками в конструкции штампов, дефицитом времени, отведенном для исследований.

## **Литература**

1. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. М.: Металлургия, 1983. – 352 с.