

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

## УСЛОВИЯ СОЕДИНЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ПО РЕЛЬЕФНОЙ ГРАНИЧНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С УТОНЕНИЕМ

**Вступ.** Современные тенденции развития машиностроительной отрасли промышленности характеризуются повышенными требованиями к качеству и эксплуатационным свойствам изделий при сравнительно малых затратах и себестоимости. Для обеспечения эффективности изделий машиностроения в их конструкциях широко используют сочетание различных материалов для обеспечения необходимых специфических функциональных свойств, которые не присущи ни одному из элементов в отдельности. Для этих целей широкое применение находят слоистые металлические элементы трубчатой формы (биметаллические трубчатые элементы – БТЕ), которые используются как переходники для соединения трубопроводов в топливных системах, также для соединения в конструкциях наукоемких изделий машиностроения из разнородных металлов таких как алюминий, сталь, титан и другие.

Соединение слоев БТЕ, как правило, реализуют путем диффузионной сварки давлением при высоких температурах. Для этого используют различные процессы, такие как прокатка, протяжка, волочение и другие, которые характерны для массового и серийного производства [1]. В современных условиях для обеспечения конкурентной способности изделий на рынке необходимо обеспечивать эффективность реализации и мобильности производства БТЕ в мелкосерийном и единичном производстве. В работах [2-3] авторами предложен наиболее эффективный процесс получения БТЕ вытяжкой с утонением из листовых заготовок разнородных металлов.

Недостатком этого процесса является не стабильное образование диффузионного соединения. Улучшение прочности соединения возможно при использовании комбинированных методов, например сочетания диффузионного и механического соединения. В этом случае поверхности разнородных металлов соединяются по криволинейной образующей, что увеличивает прочность соединения на сдвиг.

**Постановка задачи.** Теоретическим основам и анализу энергосиловых параметров процесса вытяжки с утонением цилиндрических изделий посвящены работы [4-6].

В работах [7] авторов рассмотрен анализ кинематических параметров и деформационных особенностей формообразования двухслойной заготовки разнородных металлов для условий горячей деформации с учетом сил трения на контактных поверхностях при вытяжке с утонением. В этих работах соединение слоев рассматривалось по прямолинейной образующей. Использование криволинейной образующей меняет схему напряженного состояния. Поэтому теоретический анализ расчета параметров процесса совместной вытяжки с утонением, которые необходимы для формирования элементов рельефа на граничной поверхности является актуальной научно-технической задачей.

В данной работе авторами рассмотрены результаты расчета и отработки процесса деформирования двухслойной заготовки вытяжкой с утонением с учетом геометрии деформирующего инструмента, изменения толщины слоев металлов, которые влияют на напряженно-деформированное состояние на граничной поверхности и изменение скорости в очаге деформаций для формирования элементов рельефа.

Целью работы является обоснование условий соединения разнородных металлов по рельефной граничной поверхности биметаллических трубчатых элементов вытяжкой с утонением.

**Результаты работы.** Реализация диффузионно-механического соединения осуществлялась путем соединения слоев разнородных металлов, на одном из которых нанесен криволинейный рельеф, который в процессе соединения заполняется металлом менее прочного слоя (рис. 1, а). Для определения заполнения элементов формы рельефа граничной поверхности нужно определить контактные сжимающие напряжения и выбрать необходимую оптимальную форму рельефа, которая полностью заполнится под действием сжимающих напряжений при вытяжке с утонением двухслойной заготовки.

Схема взаимодействия слоев разнородных металлов при вытяжке с утонением для диффузионно-механического соединения и расчетная схема процесса заполнения единичного конструктивного элемента рельефа граничной поверхности представлена на рис. 1 а, б [7].

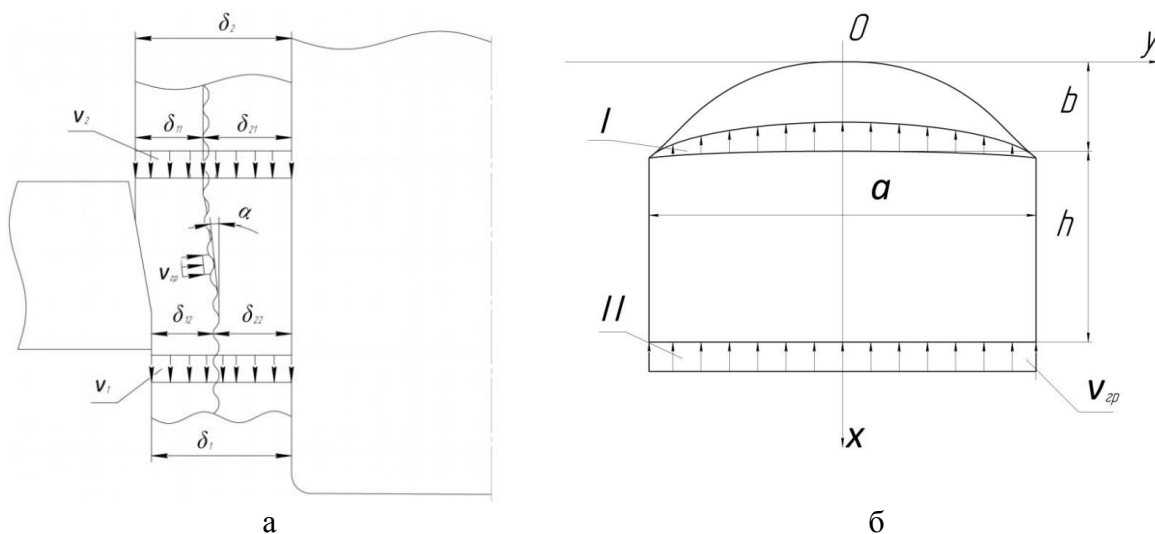


Рисунок 1 – Схема взаимодействия слоев разнородных металлов при вытяжке с утонением для диффузионно-механического соединения (а) и процесс заполнения единичного конструктивного элемента рельефа граничной поверхности (б)

Задачу считаем плоской. Пластическое течение металла рассматриваем в плоскости ХОУ. Место соединения стенок материала аппроксимируем параболической функцией.

Рассмотрим участок заготовки шириной  $a$  и высотой  $h$ , где  $h$  – половина от толщины наружного слоя металла после вытяжки с утонением согласно принятой методики [7]. При заполнении радиуса сопряжения  $I$  должна прикасаться поверхности формы рельефа, то есть по оси симметрии осуществить путь, равный  $b$ .

Считаем, что вертикальная компонента скорости на поверхности  $I$  в зависимости от координаты  $X$  изменяется по параболическому закону (рис. 1), а на поверхности  $II$  скорость постоянная и равна  $V_{гр.}$ , де  $V_{гр.}$  – скорость перемещения инструмента, которая зависит от угла матрицы. Тогда поле скоростей имеет вид:

$$V_x = \frac{3}{\sqrt{2}} V_{гр.} \left[ \left( \frac{4y^2}{a^2} - 1 \right) \left( \frac{b-x}{\sqrt{2}h} + 1 \right) + \frac{\sqrt{2}}{3h} (b-x) \right], \quad (1)$$

$$V_y = \frac{V_{гр.} y}{2h} \left( \frac{4y^2}{a^2} - 1 \right). \quad (2)$$

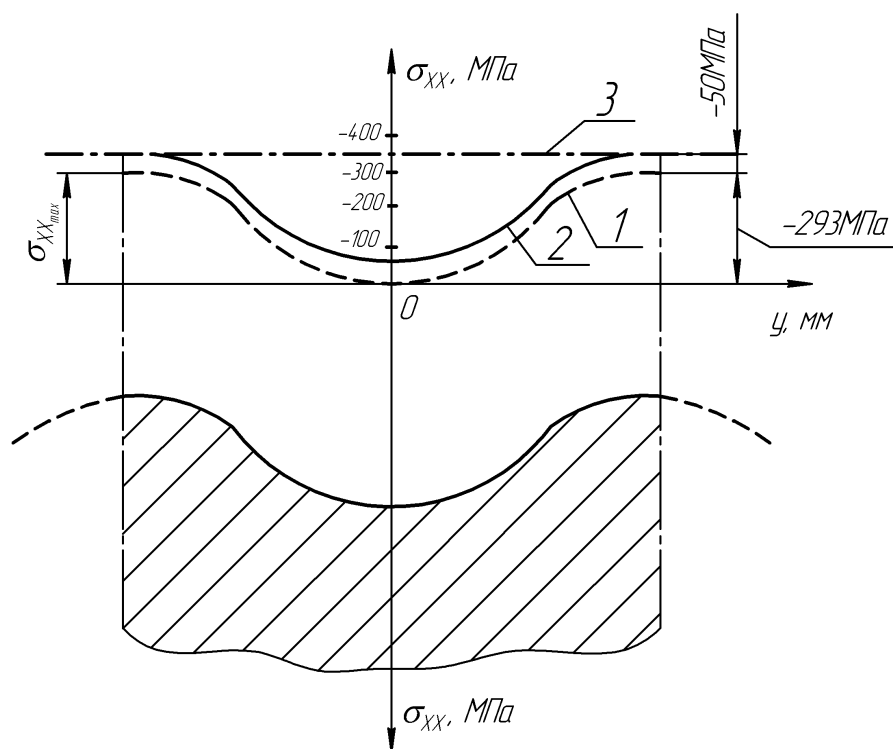
Таким образом функции (1) и (2) определяют собой поля скоростей движения частей металла при его заполнении единичного элемента рельефа. Они позволяют, используя методику [4], получить радиальную компоненту тензора напряжений, действующую на контактной поверхности:

$$\sigma_{xx} = \frac{3\sigma_s ab(b+2h)}{(12y^2 - a^2)} \left[ \frac{12y^2}{12y^2 - a^2} - 1 \right]. \quad (3)$$

где  $\sigma_s$  – предел текучести материала с меньшими механическими свойствами, соответствующими температурному интервалу обработки.

Уравнение (3) позволяет определить напряжения сжатия  $\sigma_{xx}$  на контактной поверхности рельефа, нанесенного на поверхность более твердого, при обжатии его более мягким слоем.

На основании решения уравнений (3) получен график удельного усилия сжатия на контактной поверхности в зоне единичного рельефа (рис. 2) Для композиции АМг5+12Х18Н10Т. Величина необходимого давления на внешних поверхностях слоев в очаге деформации, для полного заполнения рельефа определяется максимальным значением  $\sigma_{xx \max}$ .



1 – распределение нормального напряжения на граничной поверхности, необходимое для заполнения единичного рельефа; 2 – нормальное напряжение, которое необходимо создать на граничной поверхности единичного рельефа, необходимое для диффузионного соединения слоев металлов; 3 – величина нормального напряжения на внешних поверхностях слоїв

Рисунок 2 – Распределение нормального напряжения на поверхности слоев металлов в зоне единичного рельефа

Теоретический анализ оценки условий соединения слоев разнородных металлов при вытяжке с утонением показал что:

1. Для полного заполнения единичного рельефа необходимо сжатие, которое по величине равно  $\sigma_{xx \max}$  в месте максимальной высоты единичного рельефа (рис. 2 кривая 1).

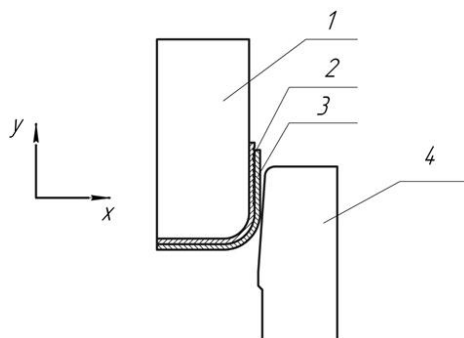
3. Для создания диффузного соединения минимальное сжатие в каждой точке граничной поверхности слоев должно превышать  $\sigma_{xx}$  на величину  $\sigma_0 = 50$  МПа;

2. Для обеспечения этого условия необходимо, чтобы в точке минимума максимальной высоты единичного рельефа контактное давление  $\sigma_{xx} \geq \sigma_0 = -50$  МПа (рис. 4 кривая 2);

4. Для обеспечения условия диффузионного соединения в данном случае сжатие, действующее на внешние поверхности, должно быть равно  $\sigma_{xx \max} + (-50)$  МПа, что составляет для данного случая  $-350$  МПа. (рис. 2, кривая 3)

В системе CAD / CAE Simufact Forming 12.0 выполнен расчет напряженного состояния двухслойной заготовки в процессе ее вытяжки с утонением с использованием рельефа граничной поверхности.

Схема процесса вытяжки с утонением приведена на рис. 3. Принималось, что вытянутый двухслойный стаканчик с предварительно нанесенным рельефом на граничной поверхности более прочного металла вытягивается через матрицу с заданной степенью обжатия. При вытяжке с утонением использовалась матрица с постоянным углом  $\alpha$  (рис. 4).



1 – пуансон; 2, 3 – внутренний и внешний слои заготовки соответственно; 4 – матрица

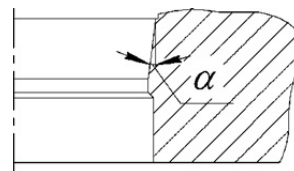


Рисунок 3 – Расчетная схема процесса местной вытяжки: Рисунок 4 – Форма рабочей поверхности матрицы для вытяжки с утонением с заданным углом  $\alpha$

Пуансон и матрица при расчете считались абсолютно жесткими. При расчете пуансона задавалась скорость и время. Для матрицы задавались нулевое перемещение и скорость. Принятая упруго-пластическая модель металлов слоев. Коэффициент трения на граничной поверхности слоев металлов  $\mu_1 = 0,3$ , коэффициент трения между заготовкой и рабочей поверхностью матрицы  $\mu_2 = 0,05$ , коэффициент трения между пуансоном и заготовкой  $\mu_3 = 0,05$ . Механические свойства металлов слоев отвечают температуре нагрева заготовки  $-420 \pm 10$  °С. Угол, который определяет очаг деформации составляет  $\alpha = 7^\circ$  степень обжатия 44 %.

На рис. 5 представлены результаты расчета распределения напряжений и деформации в очаге деформаций.

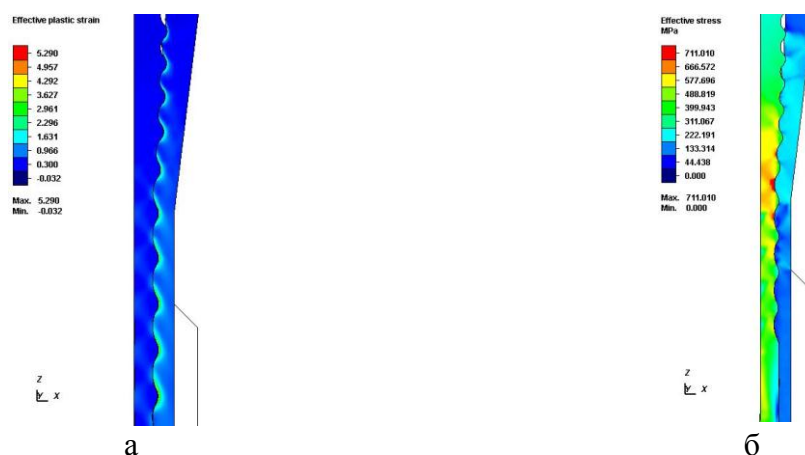


Рисунок 5 – Распределение интенсивности напряжений (а) и интенсивность деформаций в очаге деформаций (б) степень обжатия 44 %

В результате обжатия алюминиевого слоя по более прочному стальному слою стали, полностью заполняются элементы рельефа. Полученные расчетные, с использованием МКЭ данные в достаточной степени удовлетворяют с теоретическими напряжениями, полученными по формуле (3). Материал с большими механическими свойствами деформируется в меньшей степени, но граничная поверхность искажается.

На рис. 6 представлены экспериментальные образцы двухслойных заготовок после вытяжки без утонения и с утонением стенки с обжатием 44 %, а на рис. 7 представлен экспериментальный образец БТЕ.

| Вытяжка без утонения | Вытяжка с утонением | Система:<br>наружный+<br>внутренний<br>слой | Температура<br>деформирования,<br>°C | Коэффициент<br>механической<br>неоднородности<br>металлов<br>$\sigma_{S1}/\sigma_{S2}$ |
|----------------------|---------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
|                      |                     | 12X18H10T+<br>AMr5                          | 420±10                               | 0,78                                                                                   |
|                      |                     | Л63+<br>12X18H10T                           | 650±10                               | 0,58                                                                                   |
|                      |                     | BT10+AMr5                                   | 420±10                               | 0,42                                                                                   |

Рисунок 6 – Двухслойные заготовки БТЕ (стаканчики) после вытяжки



Рисунок 7 – Экспериментальный образец биметаллического трубчатого элемента

В результате экспериментального исследования обоснована схема технологического процесса изготовления БТЕ путем совместной вытяжки с утонением разнородных металлов в нагретом состоянии, подтверждены основные теоретические зависимости для расчета технологических параметров и результаты численного моделирования. Показано, что расчетные результаты отличаются от экспериментальных не более 9...11 % для разных значений коэффициента механической неоднородности.

#### Выводы.

1. На основании принятых допущений и гипотез, которые были приняты для расчета разработана теоретическая модель заполнения единичного элемента рельефа граничной поверхности и определена скорость течения металла с меньшими характеристиками прочности.

2. Выполнено численное моделирование процесса совместной вытяжки с утонением двух разнородных металлов в нагретом состоянии с использованием рельефа граничной поверхности на материале с большими прочностными характеристиками в программном комплексе CAD / CAE Simufact Forming 12.0. Анализ напряженно-деформированного состояния показал, что на граничной поверхности единичного рельефа наблюдается неравномерность напряжений и пластических деформаций по поверхности, что приводит к разности заполнения элемента граничной поверхности после снятия сжимающих нагрузок за счет упругой деформации, а также в очаге деформации создаются условия, способствующие заполнению граничной поверхности материалом с меньшими прочностными характеристиками.

3. В зависимости от угла наклона матрицы (активного угла вытяжки  $\alpha$ ) и изменения степени обжатия меняется возможная степень заполнения элементов рельефа. С увеличением степени обжатия увеличиваются напряжения деформации, что приводит к лучшему заполнению элементов рельефа. Оптимальный угол наклона матрицы соответствует 10–15°.

4. Экспериментально отработано вытяжку с утонением биметаллического стаканчика с элементами рельефа граничной поверхности в горячем состоянии и подтверждено численным и теоретическим расчетами условия заполнения элементов рельефа граничной поверхности материалом с меньшими прочностными характеристиками. Как показал численный и экспериментальный расчеты элементы рельефа могут недозаполняться, это связано с геометрическими параметрами (угол наклона матрицы и форма рельефа граничной поверхности).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тітов В. А. Витягування з потоншенням біметалевих трубчастих елементів з різнорідних металів і сплавів[текст] : монографія/ В. А. Тітов, Р. С. Борис. – Київ : Центр учбової літератури, 2014. – 180 с.
2. Тітов В. А. Напрямки розвитку способів виготовлення біметалевих трубчастих елементів з різнорідних матеріалів витягуванням / В. А. Тітов, Р. С. Борис, М. С. Тривайло / Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», серія «Машинобудування» – Київ. – 2009. – № 56. – С. 154–159.

3. Тітов В. А. Обґрунтування та реалізація дослідного процесу виготовлення біметалевих трубчастих елементів. / Тітов В. А., Борис Р. С., Вишневський П. С., Лук'яненко О. О. // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», серія «Машинобудування». – Київ. – 2010. – № 59. – С. 13–18.
4. Алексеев Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов / Ю. Н. Алексеев. – Харьков, изд-во ХГУ, 1958. – 188 с.
5. Тітов В. А. Розрахунок напружено-деформованого стану витягування з потоншенням ідеальнопластичного двошарового металу / Тітов В. А., Борис Р. С. // Обробка матеріалів тиском. – 2012. – № 1(30). – С. 45–52.
6. Борис Р. С. Особливості врахування сил тертя при витягуванні з потоншенням двошарових заготовок / Борис Р. С., Тітов В. А., Вишневський П. С. // Обработка материалов давлением. – 2012. – № 2(31). – С. 22–29.
7. Лимберг Э. А. Определение удельных давлений заполнения радиусов сопряжения в инструменте для объемной штамповки / Э. А. Лимберг, Г. Д. Селиванов // Обработка металлов давлением в машиностроении. – Вып. 17. – 1981. – С. 22–27.

УДК 621.7.011, 621.757.06

ФРОЛОВ Е. А., д.т.н., профессор  
АГАРКОВ В. В.\*, к.т.н.  
КРАВЧЕНКО С. И., к.т.н., доцент  
ЯСЬКО С. Г., ст. преподаватель

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка,  
г. Полтава, Украина

\*Г. П. Харьковстандартметрология г. Харьков, Украина

### **ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ОБРАТИМЫХ ШТАМПОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТОЧНОСТИ ШТАМПУЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ**

**Введение.** Появление и развитие новых видов прогрессивной, высокопроизводительной штамповой оснастки поставили перед наукой и производством ряд новых проблем. Одной из таких проблем является повышение надежности и долговечности штампов применительно к новым задачам и эксплуатационным условиям.

К настоящему времени успешно зарекомендовали себя на практике и широко эксплуатируются универсально-сборные штампы с пазами 8 и 16 мм, переналаживаемые штампы для поэлементной штамповки, универсальные штампы блочно-пакетного типа и др., позволяющих отказаться от традиционных способов крепления пуансонов, матриц и других деталей штампов. Причем каждому из перечисленных видов технологического оснащения соответствует своя экономически целесообразная область применения в многономенклатурном производстве при дискретно нестабильных программах выпуска изделий.

**Постановка задачи.** Как показала практика, подкрепленная серьезными теоретическими и экспериментальными исследованиями, хорошо зарекомендовали себя переналаживаемые штампы с использованием композиционных материалов на основе акриловых самоотвердеющих пластмасс, типа АСТ-Т [1-6] для закрепления рабочих элементов в них. Однако в существующей технической литературе недостаточно сведений по оценке надежности системы обратимых штампов для разделительных операций.