

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВЫТЯЖКЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ В ПЛАНЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ БИМЕТАЛЛА «АЛЮМИНИЙ–МЕДЬ»

© 2020 г. Т.В. Гайкова, Р.Г. Пузырь, Р.В. Левченко

Кременчугский национальный университет (КрНУ) им. М. Остроградского, г. Кременчуг, Украина

Статья поступила в редакцию 24.10.19 г., доработана 14.02.20 г., подписана в печать 18.02.20 г.

Проведены исследования напряженно-деформированного состояния фланца полуфабриката из биметалла «алюминий–медь» при вытяжке прямоугольных в плане коробок. В работе использовался метод сеток со следующими допущениями: об изотропности и несжимаемости материала; однородности деформации в пределах каждой ячейки; о монотонности деформирования, плоского напряженного и объемного деформированного состояния; упругими деформациями пренебрегали. Для минимизации погрешностей измерений координатных сеток и сокращения времени на обработку полученной информации применялась программа моделирования САД. Заготовки представляли собой прямоугольник определенных размеров со сваренными между собой взрывом слоев алюминия АД и меди М4, которые подвергались предварительной термической обработке перед операцией вытяжки. Прямоугольные заготовки последовательно вытягивались на высоту 10 мм, после вытяжки проводились измерения сетки и толщины исследуемого образца. Образцы заготовок фотографировались с одинаковым фокусным расстоянием и загружались в прикладную программу. В программе на узлы сетки наносились координатные точки, а затем измерялись расстояния и координаты этих точек до деформации и после нее. Результаты замеров показали, что наибольшую деформацию испытывают угловые зоны заготовки, где сжимающие напряжения возрастают от биссектрисы угла до стенок. Эти напряжения приводят к расслоению биметаллической заготовки и возникновению гофров по слою меди. Вытяжке подвергались 20 заготовок, и в каждом случае наблюдалось гофрообразование на фланце. Варьирование величиной давления прижима с 0,25 до 0,5 МПа положительных результатов не принесло. Наибольшую интенсивность деформации испытывает торцевая часть фланца коробки, и при подходе к отверстию матрицы интенсивность деформаций уменьшается на 20 %. Действие угловых сдвигающих напряжений приводит к нарушению сплошности переходной зоны, которая характеризуется наличием интерметаллидной прослойки с пониженными пластическими свойствами.

Ключевые слова: вытяжка, напряжения, деформации, биметалл, алюминий, медь, метод сеток, эксперимент, заготовка, коробка.

Гайкова Т.В. — канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения КрНУ (39600, Украина, Полтавская обл., г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20). E-mail: tanyaikaikova@ukr.net.

Пузырь Р.Г. — докт. техн. наук, доцент той же кафедры КрНУ. E-mail: puzyruslan@gmail.com.

Левченко Р.В. — канд. техн. наук, ст. препод. той же кафедры КрНУ. E-mail: levroma2005@gmail.com.

Для цитирования: Гайкова Т.В., Пузырь Р.Г., Левченко Р.В. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния при вытяжке прямоугольных в плане деталей из биметалла «алюминий–медь». *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. No. 3. С. 23–31. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-3-23-31.

Haikova T.V., Puzyr R.H., Levchenko R.V.

Experimental research of the stress-strain state when drawing aluminum-copper bimetal parts rectangular in plan

The stress-strain state of the aluminum-copper bimetal blank flange was studied when extracting boxes rectangular in plan. The studies were carried out using the grid method with assumptions about the material isotropy and incompressibility; uniform deformation within each cell; monotonous deformation, plane stress and three-dimensional strain state, while elastic strains were neglected. A CAD modeling program was used to minimize coordinate grid measurement errors and reduce the time for processing the information obtained. The blanks were rectangles of certain sizes with an explosion-welded AD aluminum and M4 copper layers subjected to preliminary heat treatment before the drawing operation. Rectangular blanks were successively drawn to a height of 10 mm with grid and test sample thickness measurements after drawing. Blank samples were photographed with the same focal length and loaded into the application program. In the program, coordinate points were applied to grid nodes with the distances and coordinates of these points measured before and after strain. According to measurement results, the highest strain was observed in the blank corner areas where compressive stresses increased from the angle bisector to the walls. These stresses led to bimetallic blank stratification and

corrugations formed along the copper layer. 20 blanks were drawn, and corrugation was observed on the flange in each case. Varying the hold-down pressure from 0.25 to 0.5 MPa gave no positive results. The highest strain intensity is observed at the end part of the box flange, and this value decreases by 20 % at the approach to the die hole. The effect of angular shear stresses leads to a discontinuity in the transition zone featuring by the presence of an intermetallic layer with reduced plastic properties.

Keywords: extraction, stresses, strains, bimetal, aluminum, copper, grid method, experiment, blank, box.

Haikova T.V. — Cand. Sci. (Tech.), associate prof. of the Department of engineering technology of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University (KMONU) (39600, Ukraine, Kremenchuk, Pershotravneva str., 20).
E-mail: tanyahaikova@ukr.net.

Puzyr R.H. — Dr. Sci. (Tech.), associate prof. of the Department of engineering technology of KMONU.
E-mail: puzyruslan@gmail.com.

Levchenko R.V. — Cand. Sci. (Tech.), senior lecturer of the Department of engineering technology of KMONU.
E-mail: levroma2005@gmail.com.

Citation: Haikova T.V., Puzyr R.H., Levchenko R.V. Experimental research of the stress-strain state when drawing aluminum-copper bimetal parts rectangular in plan. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2020. No. 3. P. 23–31 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-3-23-31.

Введение

Детали коробчатой и прямоугольной в плане формы получили широкое применение в автомобилестроении, самолетостроении, в производстве различных изделий в электротехнике и энергетике. В основном их изготавливают операциями вытяжки из листового материала. Процессы вытяжки коробчатых деталей изучены и освещены в специальной литературе достаточно обширно и детально, но с использованием новых материалов и методов совмещения операций возникает необходимость в доработке математических моделей деформирования, например, двухслойных металлов с учетом неравномерности деформаций по слоям [1, 2].

Вытяжка коробчатых деталей является признанно сложным процессом листовой штамповки ввиду наличия угловых зон, в которых возникают касательные напряжения, что обуславливает неравномерное распределение деформаций по периметру полуфабриката и чрезмерное их утонение [3–5].

Отсутствие осевой симметрии деформирования при вытяжке прямоугольных деталей приводит к тому, что направления, нормальные к контуру отверстия матрицы, перестают быть главными и, следовательно, напряжения σ_p , действующие по нормальным к контуру отверстия матрицы при вытяжке плоской заготовки, и перпендикулярные им напряжения σ_θ уже не являются главными нормальными напряжениями. Это существенно усложняет анализ процесса деформирования заготовки при вытяжке неосесимметричных деталей [6, 7], где нужно учитывать касательные напряже-

ния $\tau_{\theta p}$, которые действуют в радиальных направлениях и вызывают сдвиговую деформацию.

Точное решение частной задачи теории пластичности по выявлению характера изменения напряжений $\tau_{\theta p}$ вдоль контура отверстия матрицы и влияния этих напряжений на величину растягивающих меридиональных напряжений весьма сложно и объясняется неясностью граничных условий, неизвестностью интенсивности убывания касательного напряжения по мере удаления от стыка и большой сложностью отыскания зависимости $\tau_{\theta p} = f(\theta)$. В этом случае многие авторы схематизируют условия деформирования и используют ряд допущений [8–10]. Так, например, автор [11] в числе допущений, упрощающих решение задачи, принимает, что ширина фланца постоянна, касательные напряжения являются функцией угла θ и не зависят от радиуса ρ , зависимость напряжений τ от угла θ линейна.

Вытяжка, являясь сложным процессом для анализа монометаллов, усложняется для многослойных металлов еще в большей степени, так как требуется учитывать неоднородную деформацию слоев композиции, а также упрочнение и анизотропию. При пластической деформации в слоях композиции возникают зоны с разнозначными внутренними напряжениями, которые могут привести к образованию складок, гофр и даже разрывов и расслоений на готовом изделии [12, 13].

В настоящее время не разработано универсальных методов определения силовых параметров процессов деформирования слоистых металлов и закономерностей формоизменения металличе-

ких композиций. Поэтому цель данного исследования — экспериментальное определение и анализ тензорных полей напряжений и деформаций биметаллических (алюминиево-медных) заготовок при вытяжке низких прямоугольных коробок с фланцем и формирование рекомендаций для разработки научно обоснованных технологий формоизменения биметаллических материалов.

Методика исследований

Экспериментальные исследования, направленные на определение полей напряжений и деформаций заготовки при вытяжке коробчатых деталей из биметалла «алюминий—медь», проводились методом сеток. Метод делительных сеток является наиболее простым из оптических методов: на исследуемую поверхность наносят систему точек, линий или других меток, изменение взаимного расположения и конфигурации которых позволяет определить перемещения, деформации, скорости и другие исследуемые величины. Были приняты следующие допущения [14, 15]:

- гипотеза об изотропности и несжимаемости материала;
- гипотеза об однородности деформации в пределах каждой ячейки;
- процесс является близким к монотонному деформированию, а следовательно, могут быть использованы положения деформационной теории пластичности;
- заготовка находится в условиях плоского напряженного и объемного деформированного состояния;
- упругие деформации являются величинами более высокого порядка малости по сравнению с пластическими и в расчетах не учитываются;
- компоненты деформации условно принимаются средними и относятся к центру ячейки.

Метод сеток позволяет получить надежные результаты при измерении деформаций от 5 % и более [16, 17]. Абсолютную погрешность определения перемещений определяют по формуле [17]

$$A(u) = A(x) - A(X), \quad (1)$$

где $A(x)$ и $A(X)$ — абсолютные погрешности измерения координатной сетки соответственно до деформаций и после. Значения этих погрешностей зависят от используемого измерительного инструмента и способа нанесения сетки.

Обработка экспериментальной информации

методом координатных сеток остается достаточно трудоемким процессом, что обусловлено большим количеством измерительных операций. Поэтому для обработки экспериментальных данных применяли визуализацию исходной информации с помощью прикладных программ трехмерного моделирования, что позволило упростить измерение координат исходной и деформированной сеток и частично автоматизировать процесс вычисления перемещений и деформаций средствами используемых программ.

Для минимизации погрешностей измерений координатных сеток применяли программный комплекс КОМПАС 3D V16 компании «Аскон» (Россия). Исходная квадратная сетка наносилась на прямоугольные образцы заготовки с двух сторон с шагом 3 мм с помощью специального резца. Он устанавливался в шпиндель вертикально-фрезерного станка 6Р12, а заготовки закреплялись прихватами на координатном столе; механизмы позиционирования станка допускают погрешность позиционирования 0,01 мм.

Образцы заготовок фотографировались с одинаковым фокусным расстоянием и загружались в прикладную программу. В программе на узлы сетки наносились координатные точки, а затем измерялись расстояния и координаты этих точек (рис. 1).

Исходя из целей эксперимента была спроектирована и изготовлена технологическая оснастка, которая представляла собой прямоугольную матрицу и пуансон. Радиусы закругления вытяжных ребер матрицы и пуансона не варьировались и были равны $r_m = r_n = 3$ мм. Глубина вытяжки фиксировалась по отметчику хода ползуна пресса и в каждом опыте являлась фиксированной (10 мм) для изучения влияния высоты вытяжки на распределение напряжений и деформаций, а также утонение материала в угловых зонах. Зазор между матрицей и пуансоном выбирался по рекомендациям [18] и составил $z = s + \delta + a = 1,8 + 0,01 + 0,21 = 2,02$ мм, где $s = 1,8$ мм — толщина материала; $\delta = 0,01$ мм — положительное отклонение допуска по ГОСТ 19903-74; $a = 0,21$ мм — прибавка по [18]; для прямолинейных участков и для зон углов $z_y = z + 0,1s = 2,02 + 0,18 = 2,2$ мм.

В качестве материала заготовок использовали алюминий АД толщиной 1 мм и медь М4 толщиной 0,8 мм. Заготовки вырезались из листа до размеров 100 × 50 мм, на них наносилось семейство перпендикулярных прямых, образующих квад-

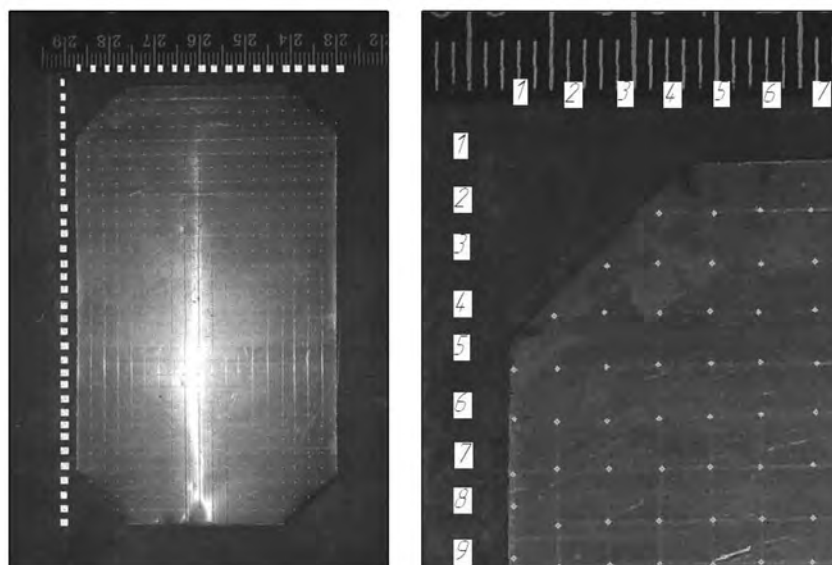


Рис. 1. Фотография заготовки с координатными точками в САД-системе КОМПАС 3D V16

ратную сетку с размером ячейки 3×3 мм с двух сторон. Лист биметалла предварительно получали сваркой взрывом — технология изготовления детально описана в работах [19–21]. После сварки взрывом композит получает деформационное упрочнение, и для возможности последующего качественного формоизменения необходимо проводить термообработку. Термическая обработка биметалла способствует заживлению микротрещин на границе раздела и формированию равновесной структуры приконтактных объемов алюминия и тем самым определяет более высокие пластические свойства материала [22–24]. Алюминий имеет свойство термически упрочняться при отжиге после холодной деформации, и кроме основного процесса — рекристаллизации — может протекать побочный процесс — частичная закалка (подкалка) с последующим старением [25, 26]. Поэтому отжиг заготовок производился согласно рекомендациям [27–29].

При формоизменении заготовок использовали гидравлический пресс модели ДБ 2430 усилием 1000 кН. Высота вытяжки определялась по метки ходу пуансона.

Результаты и их обсуждение

Последовательно вытягивались прямоугольные заготовки на высоту 10 мм, проводились измерения сетки и толщины исследуемого образца после вытяжки. На рис. 2 и 3 изображены заготов-

ки до деформации и полученные полуфабрикаты. На рис. 4 показаны начальная сетка и нумерация точек после деформации, которые размещались в рабочем окне программы КОМПАС 3D V16. В используемой САД-системе измерялись координаты исходного и деформированного полей точек, результаты заносились в таблицы. На рис. 5 представлен типичный фрагмент совмещенного поля точек в программном комплексе.

Получив картину перемещений и деформаций каждой ячейки заготовки (см. рис. 5), проводили расчет истинных деформаций в характерных зонах полуфабриката. Для этого использовали метод Зибеля, основанный на деформационной теории пластичности [14, 30]. Величины главных

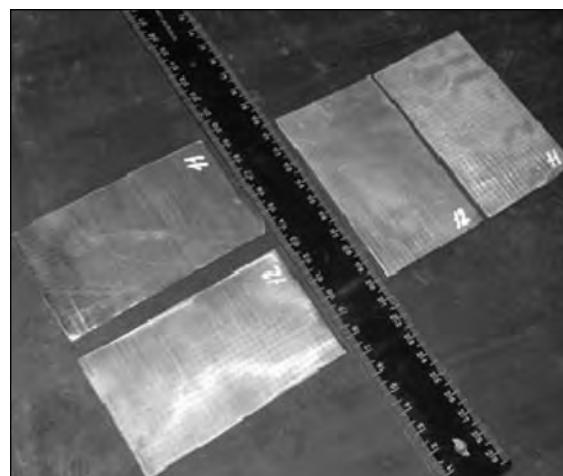


Рис. 2. Заготовки из биметалла

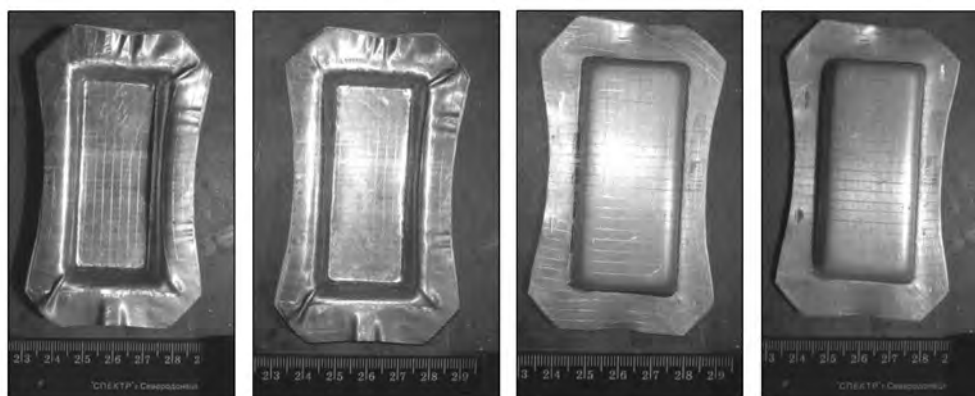


Рис. 3. Полуфабрикаты после деформации

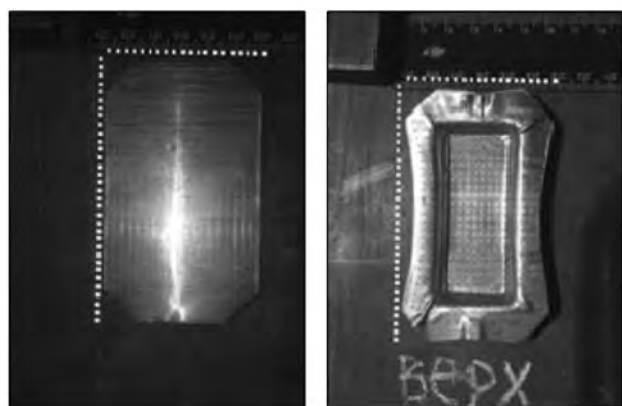
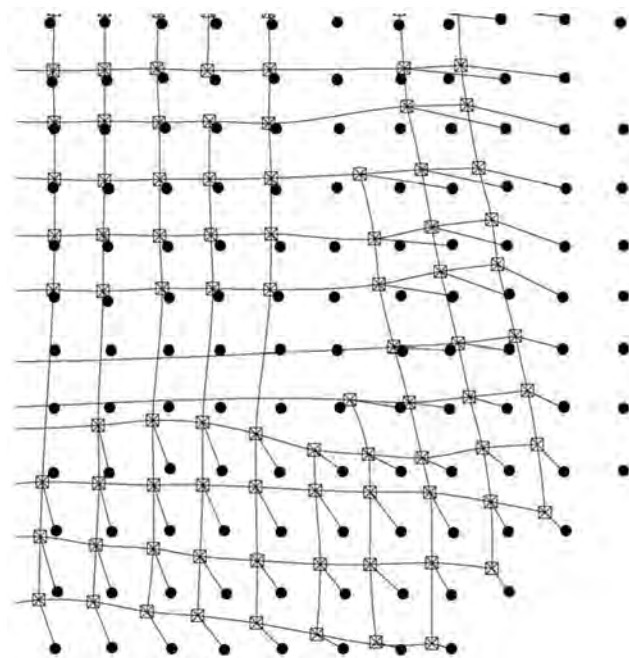


Рис. 4. Нумерации точек до (слева) и после (справа) деформации

Рис. 5. Фрагмент совмещенного поля ячеек заготовки
Черные точки — до деформации заготовки,
квадраты — после деформации

истинных деформаций определяли следующим образом:

$$e_1 = \ln \frac{a}{a_0}; e_2 = \ln \frac{b}{a_0}; e_3 = -e_1 - e_2, \quad (2)$$

где $2a, 2b$ — стороны прямоугольника; $2a_0$ — сторона начального квадрата.

Уравнение (2) использовали для расчета логарифмических деформаций на прямых участках заготовки, т.е. там, где начальная квадратная ячейка превращалась после деформации в прямоугольник. В угловых зонах заготовки, где начальный квадрат переходил в параллелограмм и изменялось направление главных осей, применяли следующие зависимости [31]:

$$e_1 = \frac{1}{2} \ln \frac{a_1^2 + b_1^2 + \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4a_1^2 b_1^2 \sin^2 \delta}}{2a_0^2},$$

$$e_2 = \frac{1}{2} \ln \frac{a_1^2 + b_1^2 - \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4a_1^2 b_1^2 \sin^2 \delta}}{2a_0^2}, \quad (3)$$

$$e_3 = -e_1 - e_2,$$

где δ — угол между сторонами параллелограмма; $2a_1, 2b_1$ — стороны параллелограмма.

Необходимо отметить, что логарифмические деформации не являются тензорными величинами и их использование в данной работе для определения поля деформаций обусловлено тем, что они дают более точную картину их распределения и обладают свойством аддитивности. Также известно [32], что при величине относительной деформации меньше 20 % различие между относительной и логарифмической деформациями незначительно. Поэтому логарифмическую деформацию приближенно можно считать равной относительной.

Усредненные оценки нормальных напряжений

Участок заготовки	σ_r , МПа	σ_θ , МПа
Угловая зона заготовки		
Торец фланца по биссектрисе угла	112	–16
Середина фланца по биссектрисе угла	–18	–138
На входе в матрицу по биссектрисе угла	104	–30
Сопряжение закруглений с прямыми участками		
С коротким участком	–60	–144
С длинным участком	–72	–145
Участок заготовки	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа
Середина боковых сторон		
Короткая сторона	38	–90
Длинная сторона	–70	–165

направлении, подвержены места сопряжений закругленных участков угловых зон с прямыми участками боковых сторон. Также экстремальные значения сжимающих напряжений получает середина длинной стороны полуфабриката в направлении главной оси y , которая параллельна короткой стороне коробки. Такое распределение напряжений характерно для однослойных коробчатых полуфабрикатов с фланцем [11, 18, 38, 39]. Однако вызывает интерес появление сжимающих радиальных напряжений по середине фланца в угловой зоне полуфабриката, что не соответствует устоявшимся представлениям о распределении напряжений в этой зоне для монометалла, где растягивающие напряжения постепенно нарастают от торца к входной кромке матрицы. Очевидно, появление сжимающих напряжений связано с большей деформацией менее прочного алюминия и со сдерживающими эту деформацию сжимающими напряжениями более прочной меди.

Также следует отметить, что наибольшие деформации сжатия испытывают угловые зоны заготовки и ее сопряжения с прямыми участками. Эти деформации приводят к расслоению биметаллической заготовки и возникновению гофров по слою меди. Вытяжке подвергались 20 заготовок, и в каждом случае наблюдалось гофрообразование на фланце. Варьирование величиной давления прижима с 0,25 до 0,5 МПа положительных результатов не принесло. Это факт подтверждает

положение об увеличении толщины фланца при вытяжке как для биметаллов, так и монометаллов, что приводит к потере устойчивости боковых стенок и разрушению сварного соединения [40–42].

Постановка опытов основывалась на положениях математической теории планирования эксперимента с реализацией ортогональных ротатбельных планов первого порядка и рандомизацией последовательности проведения опытов. Для обработки результатов привлекались методы теории вероятностей и математической статистики [43, 44]. Воспроизводимость опытных данных подтверждается критерием Кохрена ($G_{\text{расч}} = 0,269 \leq G_{\text{таб}} = 0,9065$) при уровне значимости 5 %.

Заключение

Как показали проведенные эксперименты, распределение компонент тензора деформаций и напряжений при вытяжке биметалла «алюминий–медь» крайне неоднородно. Одни и те же участки фланца полуфабриката подвержены действию знакопеременных деформаций и напряжений. Так, прямые фланцевые зоны испытывают наибольшие сжимающие напряжения и деформации по длине, в то время как по ширине фланца формируются растягивающие деформации порядка 11 %, при этом вызывающие их сжимающие напряжения равны ~70 МПа. Это не противоречит механическим схемам напряжений, где по оси минимального напряжения происходит деформация сжатия, а по оси максимального напряжения — деформация удлинения [32]. Однако на коротком прямолинейном участке уровень сжимающих напряжений почти в 2 раза ниже по сравнению с длинным участком, а сжимающих деформаций — в 5 раз, что говорит о большем укорочении удлиненного участка при втягивании его в отверстие матрицы. Поэтому усилие прижима фланца должно на удлиненных участках быть как минимум в 2 раза больше, чем на укороченных, для предотвращения гофрообразования и расслоений биметалла.

Особого внимания заслуживает угловая зона фланца. Здесь наблюдается «аномальное» распределение компонент напряжений, не укладывающееся в существующие закономерности формообразования монометаллических заготовок. Растягивающие радиальные напряжения максимальны около торца заготовки и минимальны (переходят в сжимающие) в центре фланца по биссектрисе угла, на подходе к входу матрицы вновь становятся

растягивающими. На сопряжении закругленных участков с прямыми они переходят в разряд сжимающих радиальных напряжений. В свою очередь тангенциальные сжимающие напряжения, действующие по биссектрисе угла, максимальны по модулю в центре фланца и минимальны у его торца и на входе в матрицу. Экстремальные значения они принимают на участках сопряжения. Как указывалось ранее, такая картина распределения компонент тензора напряжений, очевидно, связана с разной степенью деформации, получаемой каждым металлом композиции, а также с различными коэффициентами трения для меди и алюминия по стали. Эти обстоятельства определяют направления последующих исследований, которые будут связаны с анализом напряженно-деформированного состояния фланца прямоугольного полуфабриката со стороны алюминия, сравнением результатов и формированием рекомендаций для разработки технологии формоизменения биметаллических заготовок «алюминий—медь», полученных сваркой взрывом.

Литература/References

1. Гуревич Л.М., Волчков В.М., Трыков Ю.П., Киселев О.С. Моделирование процесса глубокой вытяжки трубчатых переходников из слоистых титаноалюминиевых пластин. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2014. No. 4. С. 30 — 35. DOI: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2014-4-30-35>.
Gurevich L.M., Volchikov V.M., Trykov Yu.P., Kiselev O.S. Simulation of deep drawing tubular coupling pieces from layered titanium-aluminium plates. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2014. No. 4. P. 30—35 (In Russ.).
2. Haikova T., Puzyr R., Dragobetsky V., Symonova A., Vakylenko R. Finite-element model of bimetal billet strain obtaining box-shaped parts by means of drawing. In: *Advances in design, simulation and manufacturing II*: Proc. 2nd Int. conf. on design, simulation, manufacturing: The innovation exchange (11—14 June 2019). Luts'k, Ukraine: Springer, 2019. P. 85—94. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_9.
3. Борис Р.С., Холявік О.В., Вишневіський П.С. Розрахунок напружено-деформованого стану при витягуванні з потоншенням двошарового металу. *Науковий огляд*. 2017. No. 7 (7). С. 40—47.
Boris R., Kholiavik O., Vyshnevsky P. Calculation of stressed-deformed state during drawing with the thinning of two-layer metal. *Naukovyi oglyad*. 2017. No. 7. P. 40—47 (In Ukr.).
4. Hassan M.A., Ahmed K.I.E., Takakura N. A developed process for deep drawing of metal foil square cups. *J. Mater. Process. Technol.* 2012. No. 212 (1). P. 295—307. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.09.015.
5. Harpell E.T., Worswick M.J., Finn M., Jain M., Martin P. Numerical prediction of the limiting draw ratio for aluminum alloy sheet. *J. Mater. Process. Technol.* 2000. No. 100. P. 131—141.
6. Gavas M., Izciler M. Effect of blank holder gap on deep drawing of square cups. *Mater. Design*. 2007. No. 28. P. 1641—1646.
7. Kalyuzhnyi O.V., Kalyuzhnyi V.L. Intensification of forming processes of cold sheet stamping. Kyiv: Sik Group Ukraine LLC, 2015.
8. Yan G.X., Wang X.Y., Deng L. A study of hole flanging-upsetting process. *Adv. Mater. Res.* 2014. Vol. 939. P. 291—298.
9. Luo J.C. Study on stamping-forging process and experiment of sheet metal parts with non-uniform thickness. *Wuhan: Huazhong Univ. Sci. Technol.* 2011. No. 51. P. 49—54.
10. Puzyr R., Savelov D., Argat R., Chernish A. Distribution analysis of stresses across the stretching edge of die body and bending radius of deforming roll during profiling and drawing of cylindrical workpiece. *Metall. Min. Ind.* 2015. No. 1. P. 27—32.
11. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1977.
Popov E.A. Fundamentals of the theory of sheet punching. Moscow: Mashinostroenie, 1977 (In Russ.).
12. Wang X.Y., Ouyang K., Xia J.C. FEM analysis of drawing-thickening technology in stamping-forging hybrid process. *Forg. Stamp. Technol.* 2009. No. 34(4). P. 73—78.
13. Comsa D-S., Banabic D. Numerical simulation of sheet metal forming processes using a new yield criterion. *Key Eng. Mater.* 2007. No. 344. P. 833—840.
14. Puzyr R., Haikova T., Majernik J., Karkova M., Kmec J. Experimental study of the process of radial rotation profiling of wheel rims resulting in formation and technological flattening of the corrugations. *Manuf. Technol.* 2018. No. 18 (1). P. 106—111.
15. Asemabadi M., Sedighi M., Honarpisheh M. Investigation of cold rolling influence on the mechanical properties of explosive-welded Al/Cu bimetal. *Mater. Sci. Eng.* 2012. No. 558. P. 144—149.
16. Khosravifard A., Ebrahimi R. Investigation of parameters affecting interface strength in Al/Cu clad bimetal rod extrusion process. *Mater. Design*. 2010. No. 31. P. 493—499.
17. Kapifiski S. Analytical and experimental analysis of deep drawing process for bimetal elements. *J. Mater. Process. Technol.* 1996. No. 60. P. 197—200.
18. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1976.
Romanovskii V.P. Handbook of cold stamping. Leningrad: Mashinostroenie, 1976 (In Russ.).
19. Akbari-Mousavi S.A.A., Barrett L.M., Al-Hassani S.T.S. Explosive welding of metal plates. *J. Mater. Process. Technol.* 2008. Vol. 202. Iss. 1—3. P. 224—239.
20. Zagirnyak M.V., Dragobetskyi V.V. New methods of obtaining materials and structures for light armor protection.

- In: *Int. Conf. Military Technologies (ICMT)* (Brno, Czech Republic, 19–21 May 2015). 2015. Vol. 1. P. 705–710.
21. Dragobetsky V., Zagoryansky V., Voronin A. Process modeling of elastic-plastic deformation of steel-aluminum compositions produced by impact bonding. *Metall. Min. Ind.* 2015. Iss. 9. P. 1186–1189.
 22. Isadarea A.D., Aremob B., Adeoyec M.O., Olawalec O.J., Shittu M.D. Effect of heat treatment on some mechanical properties of 7075 aluminium alloy. *Mater. Res.* 2013. No. 16(1). P. 190–194. DOI: 10.1590/S1516-14392012.000167.
 23. Shwe W.H.A., Kay T.L., Waing K.K.O. The effect of ageing treatment of aluminum alloys for fuselage structure-light aircraft. *World Acad. Sci., Eng. Technol.* 2008. No. 46. P. 696–699.
 24. Mohammad T., Esmail E. Mechanical and anisotropic behaviors of 7075 aluminum alloy sheets. *Mater. Design.* 2010. No. 32(2). P. 1594–1599. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.001>.
 25. Li J.F., Peng Z.W. Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075 aluminium alloy with various aging treatments. *Trans. Nonferr. Met. Soc. China.* 2008. No. 18(4). P. 755–762. [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60130-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60130-2).
 26. Roberto B.F., Terence G.L. Using severe plastic deformation for the processing of advanced engineering materials. *Mater. Trans.* 2009. No. 50(7). P. 1613–1619. <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans.MF200913>.
 27. Miyazaki S., Kumai S., Sato A. Plastic deformation of Al–Cu–Fe quasicrystals embedded in Al₂Cu at low temperatures. *Mater. Sci. Eng.* 2005. No. 300 (5). P. 400–401.
 28. Chen C.Y., Hwang W.-S. Effect of annealing on the interfacial structure of aluminum-copper joints. *Mater. Trans.* 2007. Vol. 48. No. 7. P. 1938–1947.
 29. Mirzakouchakshirazi H., Eivani A.R., Kheirandish Sh. Effect of post-deformation annealing treatment on interface properties and shear bond strength of Al–Cu bimetallic rods produced by equal channel angular pressing. *Iran. J. Mater. Sci. Eng.* 2017. Vol. 14. No. 4. P. 25–34. DOI: 10.22068/ijmse.14.4.25.
 30. Puzyr R., Savelov D., Shchetynin V., Levchenko R., Haikova T., Kravchenko S., Yasko S., Argat R., Sira Y., Shchipkovakyi Y. Development of a method to determine deformations in the manufacture of a vehicle wheel rim. *East.-Eur. J. Enterprise Technol.* 2018. Vol. 4. No. 1(94). P. 55–60. DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139534>.
 31. Андрейченко В.А. Теоретические основы экспериментальных исследований пластического формоизменения. Тула: Тул. гос. ун-т, 2002.
Andreichenko V.A. Theoretical foundations of experimental studies of plastic forming. Tula: Tul'skii. gos. univ., 2002 (In Russ.).
 32. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975.
Malinin N.N. Applied theory of plasticity and creep. Moscow: Mashinostroenie, 1975 (In Russ.).
 33. Puzyr R., Haikova T., Trotsko O., Argat R. Determining experimentally the stress-strained state in the radial rotary method of obtaining wheels rims. *East.-Eur. J. Enterprise Technol.* 2016. Vol. 4 No. 1 (82). P. 52–60. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.76225>.
 34. Grushko A.V., Kukhar V.V., Slobodyanyuk Y.O. Phenomenological model of low-carbon steels hardening during multistage drawing. *Solid State Phenomena.* 2017. Vol. 265. P. 114–123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.265.114>.
 35. Markov O., Gerasimenko O., Khvashchynskiy A., Zhytnikov R., Puzyr R. Modeling the technological process of pipe forging without a mandrel. *East.-Eur. J. Enterprise Technol.* 2019. Vol. 3. No. 1(99). 42–48. DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2019.167077>.
 36. Гайкова Т.В., Пузырь Р.Г., Наумова Е.А. Результаты экспериментальных исследований по деформированию слоистых заготовок. В сб. науч. тр. *Новые решения в современных технологиях*: Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ». Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. No. 42. С. 37–42.
Haikova T.V., Puzyr R.H., Naumova E.A. The results of experimental studies on the deformation of layered blanks. In: *New solutions modern technologies*. Har'kov: NTU «HPI», 2013. No. 42. P. 37–42 (In Ukr.).
 37. Аркулис Г.Э., Дрогобид В.Г. Теория пластичности. М.: Металлургия, 1987.
Arkulis G.E., Drogobid V.G. Theory of plasticity. Moscow: Metallurgiya, 1987 (In Russ.).
 38. Hugo I. Medellín-Castillo, Pedro de J. García-Zugasti, Dirk F. de Lange, Francisco J. Colorado-Alonso. Analysis of the allowable deep drawing height of rectangular steel parts. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013. Vol. 66. Iss. 1–4. P. 371–380. DOI 10.1007/s00170-012-4331-9.
 39. Leyu W., Daxin E. Numerical simulation analysis of variable BHF drawing of rectangular cup on curve blankholder. *Mod. Manuf. Eng.* 2006. No. 2. P. 73–74.
 40. Ogorodnikov V.A., Derevenko I.A., Sivak R.I. On the influence of curvature of the trajectories of deformation of a volume of the material by pressing on its plasticity under the conditions of complex loading. *Mater. Sci.* 2018. Vol. 54. Iss. 3. P. 326–332.
 41. Aliev I., Zhibankov Y., Martynov S. Forging of shafts, discs and rings from blanks with inhomogeneous temperature field. *J. Chem. Technol. Metall.* 2016. Vol. 51. Iss. 4. P. 393–400.
 42. Yang C., Li P., Fan L. Blank shape design for sheet metal forming based on geometrical resemblance. *Procedia Eng.* 2014. Vol. 81. P. 1487–1492.
 43. Savelov D., Dragobetsky V., Puzyr R., Markevych A. Peculiarities of vibrational press dynamics with hard-elastic restraints in the working regime of metal powders molding. *Metall. Min. Ind.* 2015. No. 2. P. 67–74.
 44. Rabinovich S.G. Statistical methods for experimental data processing. evaluating measurement accuracy. N.Y.: Springer, 2013. P. 71–105. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6717-5>.