

УДК 621.983 : 669-419.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ ТРУБЧАТЫХ ПЕРЕХОДНИКОВ ИЗ СЛОИСТЫХ ТИТАНОАЛЮМИНИЕВЫХ ПЛАСТИН

© 2014 г. Л.М. Гуревич, В.М. Волчков, Ю.П. Трыков, О.С. Киселев

Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)

Статья поступила в редакцию 04.12.12 г., доработана 20.05.14 г., подписана в печать 22.05.14 г.

Описан технологический процесс получения трубчатых титаноалюминиевых переходников из сваренных взрывом заготовок с использованием операций листовой штамповки. Показана возможность моделирования с помощью программного комплекса SIMULIA/Abaqus стадий деформирования при глубокой вытяжке слоистых титаноалюминиевых композитов, позволяющего определять допустимые диапазоны варьирования радиусов закругления пуансона и входной кромки матрицы.

**Ключевые слова:** титан, алюминий, трубчатый переходник, слоистый композит, штамповка, глубокая вытяжка, моделирование.

There was described technological process of titanium-aluminium tubular coupling pieces from explosive welded stock material with the use of pressing operation. There was demonstrated possibility of stimulation with the aid of software package SIMULIA/Abaqus of the staged of deformation in deep drawing of layered titanium-aluminium composites, allowing to define permissible range of variation of the bending radii of punch and the leading edge of the die.

**Keywords:** titanium, aluminium, tubular coupling piece, layered composite, stamping, deep drawing, simulation.

### ВВЕДЕНИЕ

Сварка взрывом (СВ) широко используется для получения композиционных переходников для сварки плавлением деталей из разнородных металлов [1–3], в том числе из алюминия, плакированного титаном, применяемого в авиационной и ракетно-космической технике [4–6]. Существующие способы их производства не всегда могут обеспечить требуемые эксплуатационные свойства. Например, применение известных схем наружного плакирования СВ титановых труб алюминием из-за нестационарности детонации взрывчатого вещества и отражения ударных волн вызывает образование микротрещин и непроваров, что влечет за собой разброс прочностных характеристик по длине переходника [7]. Получение трубчатых переходников вырезкой из толстых слоистых плит приводит к зна-

чительному увеличению себестоимости производства из-за низкого коэффициента использования металла. Поэтому значительный практический интерес представляет совершенствование технологий получения заготовок трубчатых титаноалюминиевых переходников пластическим деформированием полученных сваркой взрывом тонколистовых пластин. Однако при этом необходимо учитывать значительные различия в деформационных характеристиках титановых и алюминиевых сплавов.

Целью настоящей работы являлась оптимизация операции листовой штамповки технологического процесса получения трубчатых титаноалюминиевых переходников из сваренных взрывом заготовок с использованием методов конечно-элементного моделирования.

**Гуревич Л.М.** – зав. кафедрой материаловедения и композиционных материалов ВолГТУ (400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28). Тел.: (8442) 24-80-61. E-mail: mv@vstu.ru.

**Волчков В.М.** – канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной математики ВолГТУ. E-mail: dvr@vstu.ru.

**Трыков Ю.П.** – докт. техн. наук, профессор кафедры материаловедения и композиционных материалов ВолГТУ. E-mail: mv@vstu.ru.

**Киселев О.С.** – мл. науч. сотр. той же кафедры.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для получения цилиндрических и конических переходников из композиционного материала ВТ1-0—АД1—АМг6 толщиной 4 мм (рис. 1) применяли технологическую схему, включающую неполную горячую прокатку сваренной взрывом многослойной заготовки на требуемую толщину, отжиг для повышения пластичности слоев, глубокую вытяжку стаканов и механическую обработку. Прослойка АД1 (толщиной 0,15 мм в прокатанной заготовке) выполняла роль «буфера пластичности» при СВ, уменьшая вероятность образования трещин, и диффузионного барьера, снижающего вероятность возникновения хрупких алюминидов титана в процессе технологических или эксплуатационных нагревов по сравнению со случаем непосредственного контакта ВТ1-0—АМг6.

Возможности формоизменения листовой титаноалюминиевой заготовки при глубокой вытяжке ограничиваются разрушением в зонах действия наибольших растягивающих напряжений. При проектировании и последующей отработке операции

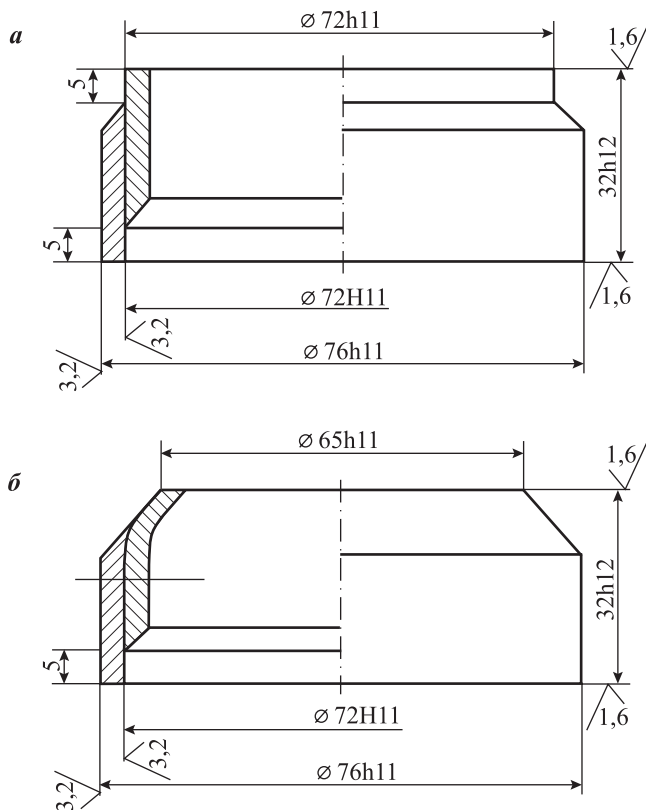


Рис. 1. Титаноалюминиевые цилиндрический (а) и конический (б) ступенчатые переходники

вытяжки стаканов особое внимание уделялось факторам, влияющим на величину предельной вытяжки, используя рекомендации для штамповки листовых титановых монометаллов [8, 9]. Небольшая разница между пределами прочности ( $\sigma_B$ ) и текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) для титана (для ВТ1-0  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  составляет 0,84 при комнатной температуре и 0,75 при 450 °С) неблагоприятно отражается на обрабатываемости давлением при вытяжке, так как состояние текучести достигается лишь при напряжениях, близких к  $\sigma_B$ , и диапазон деформирования без разрушения достаточно узок.

Как правило, случаев отрывы частей заготовки при вытяжке происходят в цилиндрической части вблизи донного закругления. Основным критерием, определяющим способность листовых материалов к глубокой вытяжке, служит предельная степень вытяжки:

$$K = \frac{1}{m} = \frac{D}{d_{cp}},$$

где  $d_{cp}$  — средний диаметр вытягиваемой детали,  $D$  — наибольший диаметр заготовки,  $m$  — коэффициент вытяжки. Рекомендуемое ее значение для ВТ1-0 при температурах вытяжки до 500 °С не более 1,66. Диаметр исходной заготовки для вытяжки без утонения, определенный по формуле, основанной на методе равенства поверхностей [9], составлял  $D = 138$  мм и, следовательно, степень вытяжки  $K = 1,83$ .

По Л.М. Шуману [9] вытяжка монометаллов без прижима возможна при справедливости соотношения

$$100(s/D) \geq 4,5(1 - m).$$

В нашем случае это неравенство выполняется, однако вытяжка титана без прижима может приводить к потере устойчивости и образованию гофр, поэтому была выбрана ее схема с прижимом. Однако в этом процессе различают несколько характерных зон с резко различающимся напряженно-деформированным состоянием (НДС), наиболее опасными из которых являются:

- участок, находящийся на закруглении рабочих кромок матрицы и испытывающий сложную деформацию с наибольшим радиальным растяжением и незначительным тангенциальным сжатием;
- расположенный в зазоре между матрицей и пуансоном цилиндрический участок с линейно-напряженным и объемно-деформированным состояниями;

— область непосредственно у донного закругления, где возникают напряжения двухосного растяжения и одноосного сжатия, приводящие к значительному растяжению и утонению стенок. Поперечное сечение тела здесь наиболее опасно с точки зрения отрыва дна от стенок изделия.

Регулировать НДС в этих участках частично можно изменением радиусов закругления на матрице и пуансоне, уменьшением шероховатости этих поверхностей и наличием смазки. Проведенными в НИИХиммаш (г. Москва) исследованиями [8] установлено, что максимальное усилие вытяжки листовых заготовок из титана и его сплавов значительно снижается с увеличением радиуса закругления входной кромки матрицы, однако если он будет больше трех толщин, на детали появляются неровности, вызванные потерей устойчивости заготовки. Варьирование радиуса закругления пуансона приводит к изменению утонения стенок в зоне перехода от донной к цилиндрической части заготовки. Рекомендации по выбору размеров элементов оснастки для деформирования слоистых материалов с составляющими, резко различающимися по прочностным характеристикам, в литературе практически отсутствуют.

Для выбора радиусов закругления пуансона и матрицы проводилось моделирование процесса вытяжки трехслойного композита АМг6—АД1—ВТ1-0 при температуре 450 °С с использованием программного комплекса SIMULIA/Abaqus, содержащего модуль Abaqus/Explicit с явной схемой интегрирования методом конечных элементов для сильно нелинейных переходных быстротекущих динамических процессов [10] (рис. 2).

Как титаноалюминиевый композит, так и элементы оснастки в 3D-модели задавались в виде деформируемых экструдированных тел [10] с соответствующими прочностными характеристиками при температуре вытяжки. Это значительно повышало время расчета по сравнению с осесимметричными моделями с недеформируемыми элементами оснастки, но позволяло более полно учитывать взаимодействие заготовки с оснасткой. Размер криволинейных сторон четырехугольных ячеек конечно-элементной сетки [10] в экструдированных фигурах был не более 1,0 мм. Размер ячеек в направлении экструдирования составлял до 1,0 мм у ВТ1-0 и АМг6, а у АД1 соответствовал толщине прослойки (0,15 мм).

Выбор температуры вытяжки объясняется наибольшей пластичностью алюминиевых поликристаллов при  $t = 450\div 500$  °С [11], когда становится возможным скольжение по плоскостям октаэдра и куба, отсутствуют резкий рост зерен в АД1 и АМг6 и образование на границе слоев алюминидов титана. При более низких температурах скольжение по плоскости октаэдра затруднено и пластичность алюминиевых поликристаллов заметно снижается.

Расчет проводился с использованием модели Мизеса. Материалы слоев трехмерного деформируемого твердого тела задавались изотропными с повышающимися при росте локальной пластической деформации пределами текучести [11, 12]. Прочность связей между слоями соответствовала прочности менее прочного элемента пары [10]. Контактные процессы на взаимодействующих поверхностях «полость матрицы — композиционный материал» и «поверхность

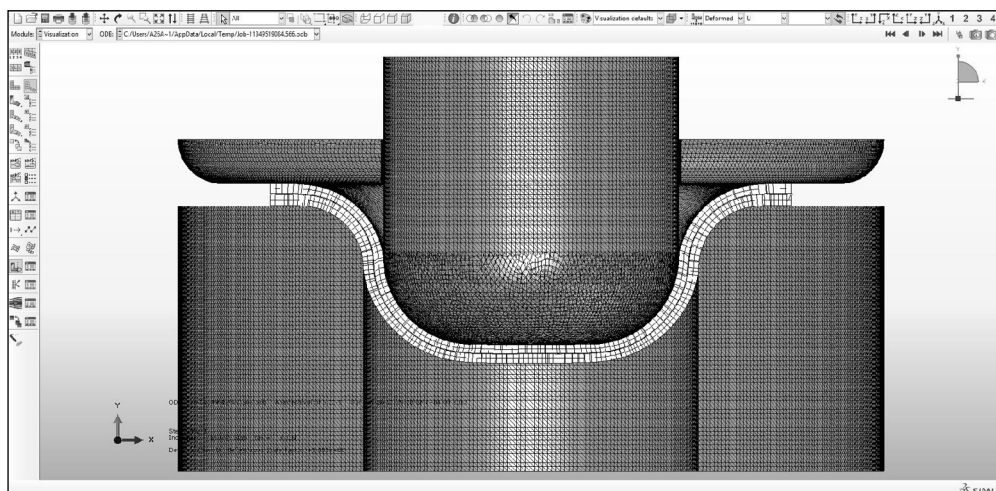


Рис. 2. Визуализация процесса расчета вытяжки трехслойного композита АМг6—АД1—ВТ1-0 с использованием программного комплекса SIMULIA/Abaqus

пуансона — композиционный материал» задавались как взаимодействие поверхности с поверхностью с коэффициентами трения 0,05—0,10 [8]. Скорость вертикального перемещения пуансона составляла 4 мм/с. Успешную верификацию положенных в основу программного комплекса SIMULIA/Abaqus моделей и использованных зависимостей прочностных характеристик от величины деформации провели по соответствию расчетных и экспериментальных распределений деформаций при более простой схеме деформирования — трехточечном изгибе образца из трехслойного титаноалюминиевого композита [12].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Устойчивая вытяжка при моделировании наблюдалась только при радиусе закругления матрицы  $R_M \geq 10$  мм, меньшие его величины для стакана с внешним слоем из АМгб приводили к интенсивной деформации у донного закругления, а при  $R_M = 8$  мм — к прекращению деформации на закруглении матрицы с удлинением вплоть до разрыва в районе донного закругления (рис. 3).

Моделирование показало возможность использования пуансонов с радиусами закругления  $R_{\Pi} = 5 \div 20$  мм. Увеличение радиуса позволяло снизить разнотолщинность формируемого стакана в цилиндрической зоне II (схема расположения зон по-

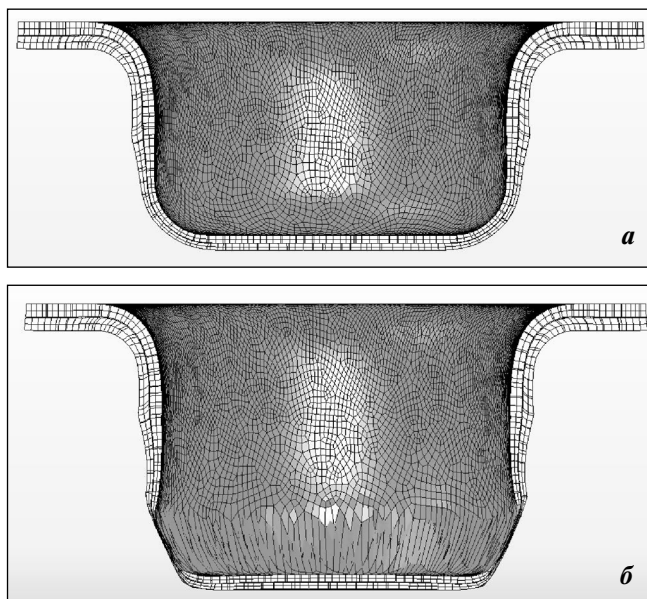


Рис. 3. Прекращение вытяжки в районе радиуса закругления матрицы  $R_M = 8$  мм (а) и интенсивная деформация у донного закругления (б)

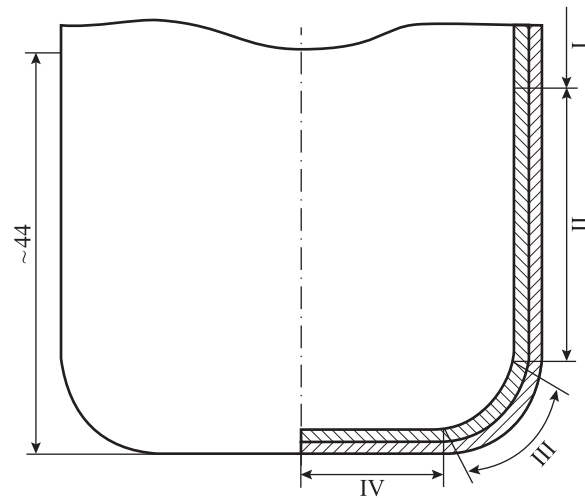
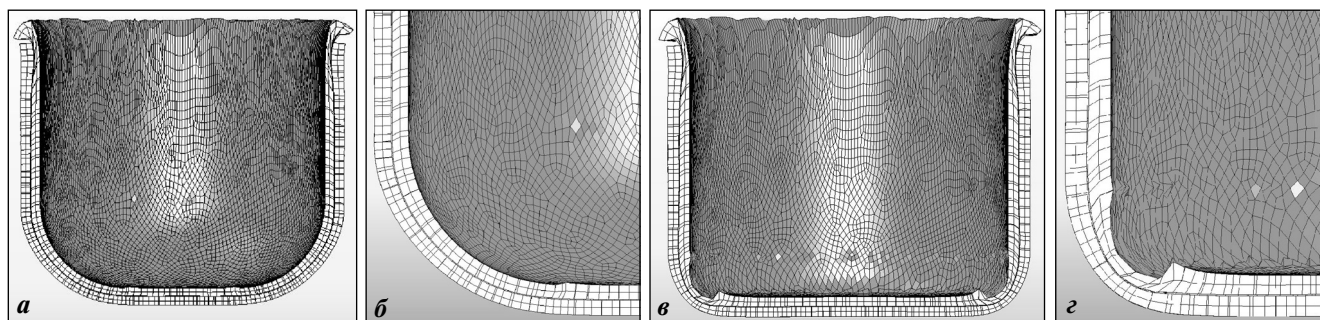


Рис. 4. Схема расположения характерных зон, различающихся деформированным состоянием

казана на рис. 4) и в донном закруглении (зона III), а следовательно, и повысить надежность протекания процесса вытяжки, однако при  $R_{\Pi} = 20$  мм значительно увеличивался объем удаляемого при механической обработке переходника металла донной части (рис. 5).

Моделирование процесса вытяжки пуансоном с радиусом 10 мм подтвердило оптимальность такого решения (рис. 6, а) и показало технологическую возможность (при аналогичных параметрах штампа) получения цилиндрического стакана с наружным слоем из АМгб, сопровождающегося значительным сдвигом алюминиевых слоев при прохождении радиуса закругления матрицы (рис. 6, б).

Традиционный процесс вытяжки стаканов из монолиста обычно приводит к утолщению деформируемого материала в зоне I. Схемы действия напряжений и деформаций для слоев композита при выполнении вытяжки с зазором больше толщины исходного материала должны сохраняться. Однако для случая внешнего расположения алюминиевого сплава АМгб следует учитывать обусловленное силами трения о поверхность полости матрицы протекание в нем сдвиговых деформаций. Кроме того, предусмотренный при моделировании зазор между пуансоном и матрицей, на 0,5 мм превышающий толщину исходного материала, оказался недостаточным для полной компенсации утолщения титанового слоя в верхней части вытягиваемого стакана, что привело к частичному выдавливанию более мягких слоев АД1 и АМгб. Совокупность этих двух факторов привела при моделировании к уменьше-



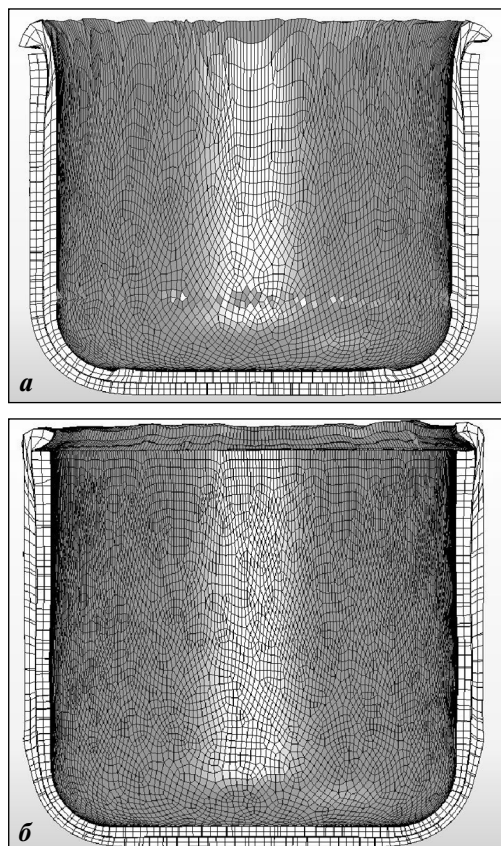
**Рис. 5.** Изменение толщины стенок в районе донного перехода при моделировании деформирования плоской заготовки из трехслойного композита АМг6–АД1–ВТ1-0 с использованием программного комплекса SIMULIA/Abaqus  
*а, б* – радиус закругления пуансона  $R_{\text{п}} = 20$  мм; *в, г* – 5 мм

нию толщины алюминиевых слоев (рис. 7) в верхней части стакана. В связи с тем, что в дальнейшем они удаляются механической обработкой, корректировка модели не потребовалась.

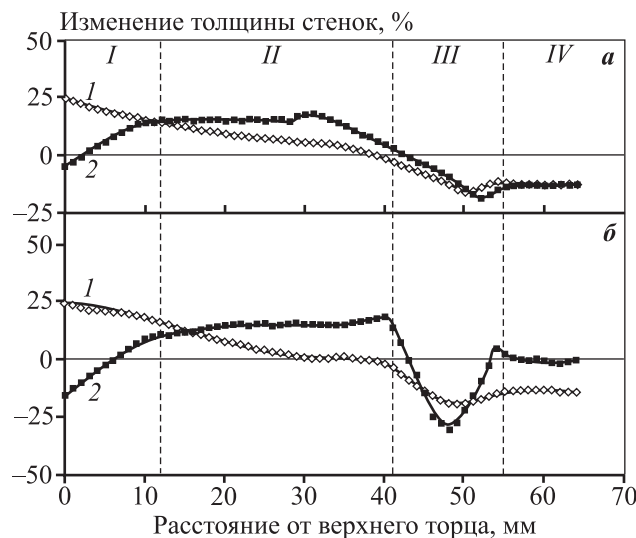
Оптимизированные радиусы закруглений были использованы при проектировании оснастки для глубокой вытяжки стаканов из титаноалюминие-

вого композита. При отработке технологии вытяжки заготовку первоначально нагревали до 450 °С, а оснастку — до 300 °С, но это приводило к разрывам у донного закругления стакана за счет быстрого охлаждения и потери пластичности. В дальнейшем подогрев оснастки и заготовки осуществляли до одной и той же температуры — 450 °С. Созданные условия для деформации титановой составляющей позволили стабильно получать требуемую форму штамповки.

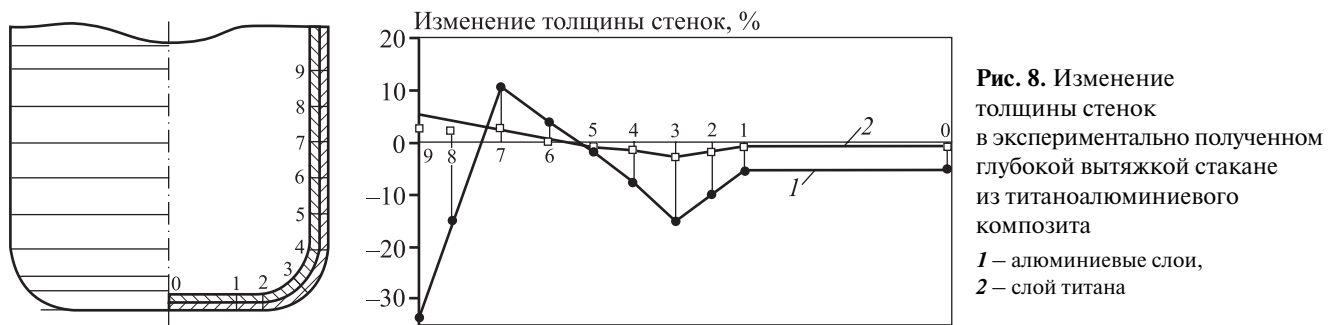
Исследование послойных деформаций в осевом темплете полученного стакана показало различие толщин стенок вследствие сложной схемы напряженно-деформированного состояния. На рис. 8 приведены кривые, показывающие их изменения. Утонение (до 15 % и 3 % для АД1 + АМг6 и ВТ1-0 соответственно) наблюдалось в зоне донного перехода.



**Рис. 6.** Изменение формы и толщины стенок цилиндрического стакана, получаемого при моделировании глубокой вытяжки с использованием пуансона с  $R_{\text{п}} = 10$  мм  
*а* – внешний слой ВТ1-0, *б* – внешний слой АМг6



**Рис. 7.** Расчетное изменение толщин слоев титана (1) и алюминиевых слоев АД1+АМг6 (2) при вытяжке  
*а* –  $R_{\text{п}} = 20$  мм, *б* – 5 мм  
 Расположение зон I–IV см. на рис. 4



Максимальное утонение алюминиевых слоев (до 35 %) происходило вблизи верхней кромки за счет их сползания по титану, что в основном и вызвало изменение толщины стенки. Уменьшение толщины титана не зафиксировано, а по мере приближения к верхней кромке она даже несколько увеличивалась. Эти данные хорошо коррелируют с результатами моделирования.

При исследовании микроструктуры титанового слоя, полученного глубокой вытяжкой стакана, четко прослеживалось изменение формы зерен Ti: в донной части они равноосные, а на цилиндрической стенке — удлиненные в направлении вытяжки.

Полученные из отштампованных стаканов цилиндрические заготовки подвергались окончательной термообработке (отжигу при 400 °С в течение 45 мин), после которой прочность соединения соответствовала наименее прочному из металлов — алюминию (10—11 МПа). Микротвердость по сечению слоев была стабильна и составляла для АМг6, АД1 и ВТ1-0 соответственно 1050, 400 и 3000 МПа.

Контроль ультразвуковым методом не выявил расслоений или разрушений в изготовленных переходниках длиной 32 мм с внутренним и наружным диаметрами 68 и 76 мм соответственно. Переходные элементы успешно прошли испытания на прочность гидравлическим давлением 0,2 МПа и на герметичность (натекание гелий-воздушной смеси под давлением 0,1 МПа не превышало  $2 \cdot 10^{-4}$  Па/с).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием программного комплекса SIMULIA/Abaqus показана возможность моделирования стадий деформирования при глубокой вытяжке слоистых титаноалюминиевых композитов, позволяющего определять допустимые диапазоны варьирования радиусов закругления пуансона и входной кромки матрицы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания и Российского научного фонда (заявка 14-19-00418).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дерibas А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980.
2. Crossland B. Explosive welding of metals and its application. Oxford: Clarendon Press, 1982.
3. Blazynski T.Z. Explosive welding, forming, and compaction. London, New York: Applied Science, 1983.
4. Gurevich L.M., Trykov Yu.P., Kiselev O.S. // Welding Intern. 2014. Vol. 28, № 2. P. 28—132.
5. Hong-bo Xia, Shao-gang Wang, Hai-feng Ben // Mater. and Design. 2014. Vol. 56. P. 1014—1019.
6. Kahraman N., Gulenc B., Findik F. // Intern. J. Impact Eng. 200. Vol. 34. P. 1423—1432.
7. Трыков Ю.П., Шморгун В.Г., Гуревич Л.М. Деформация слоистых композитов. Волгоград: ВолГТУ, 2001.
8. Галицкий Б.А., Абелев М.М., Шварц Г.Л., Шевелкин Б.Н. Титан и его сплавы в химическом машиностроении. М.: Машиностроение, 1968.
9. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. Л.: Машиностроение, 1980.
10. Abaqus 6.12. Analysis User's Manual. Vol. 1. P. 1. Introduction, spatial modeling and execution. USA, Dassault Systemes Simulia Corp., 2012.
11. Микляев П.Г., Дуденков В.М. Сопротивление деформации и пластичность алюминиевых сплавов: Справочник. М.: Металлургия, 1979.
12. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: Справочник. М.: Металлургия, 1973.
13. Гуревич Л.М., Трыков Ю.П., Волчков В.М. и др. // Изв. ВолГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. 2012. Т. 6, № 9. С. 11—15.