

УДК 669.715

АНАЛИЗ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОБТЯЖКОЙ ОБОЛОЧЕК ДВОЯКОВЫПУКЛОЙ ФОРМЫ С УЧЕТОМ РЕОЛОГИЧЕСКИХ (МЕХАНИЧЕСКИХ) СВОЙСТВ ЛИСТОВОГО АЛЮМИНИЕВОГО МАТЕРИАЛА

© 2013 В.А. Михеев¹, Ф.В. Гречников¹, С.Г. Дементьев²,
В.П. Самохвалов¹, Д.В. Савин¹, С.В. Сурудин¹

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

² ЗАО «Авиастар – СП», г. Ульяновск

Поступила в редакцию 06.09.2013

Исследовано влияние вязкопластической среды на процесс обтяжки сплава Д16, которое проводилось с использованием программы ANSYS/LS-DYNA. Созданы две реологические модели поведения данного материала в процессе пластической деформации: прежде всего для анизотропной листовой заготовки EPD-модель Барлата в состоянии упругопластического тела при деформационном упрочнении, а в качестве следующей для свежезакаленной листовой заготовки EVP- модель в состоянии упруговязкопластического тела. При анализе результатов моделирования проявились соответствия с экспериментальными данными, которые, в принципе, могут объяснить возможный разрыв оболочки в результате локализации утонения листовой заготовки в процессе формообразования обтяжкой. Ключевые слова: формообразование обтяжкой, оболочка двояковыпуклой формы, реологические модели, анизотропия механических свойств.

Освоение новых процессов формообразования обтяжкой высокотехнологичных изделий обшивок летательных аппаратов из алюминиевых сплавов требует надежных знаний о реологических (механических) свойствах, их анизотропии в зависимости от состояния поставки листового материала. Кроме того, необходимы сведения о влиянии реологических свойств деформируемых материалов на напряженно-деформированное состояние очага деформации, определяющее характер развития деформации во времени листовой заготовки в этих процессах и формирование качества готового изделия. При этом контролируемый процесс формообразования обтяжкой оболочек двояковыпуклой формы возможен только в условиях симметрии, когда из трех осей симметрии, присущих анизотропии листовой заготовки, одна из них совпадает с направлением прокатки и обтяжки, вторая – с направлением поперек прокатки, а третья – по толщине листа [1].

Любой деформируемый металл может быть представлен в виде набора элементарных моделей: упругости, вязкости и пластичности [2]. На наш взгляд, наиболее точно поведение деформируемого тела во всем его многообразии отражает среда, где «пружина», описывающая деформационное упрочнение включена последовательно с вязким элементом, моделирующим диффузионно-релаксационные процессы. Разнообразие структур, которые могут быть получены в алюминиевых сплавах при предварительной термической обработке, есть результат различной степени отклонения сплавов от термодинамически равновесного состояния. Самой неустойчивой структурой при комнатной температуре в термически упрочняемых алюминиевых сплавах является свежезакаленное состояние, которое представляет собой пересыщенный твердый раствор легирующих элементов в алюминии, концентрация которого может превышать в десятки раз равновесное состояние.

Неустойчивость свежезакаленного состояния алюминиевого сплава при комнатной температуре и склонность к естественному старению за очень короткий период времени, связанному с преждевременным распадом пересыщенного твердого раствора, технологически ограничивает возможности формообразования обтяжкой листового материала. Продолжительность этого периода времени, названного инкубационным, например, для сплава Д16 составляет всего 30-40 минут.

Михеев Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор. E-mail: vaticheev@rambler.ru
Гречников Федор Васильевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор. E-mail: gretch@ssau.ru
Дементьев Сергей Геннадьевич, генеральный директор. E-mail: d002a@aviastar-sp.ru
Самохвалов Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор. E-mail: Volovik.Lud.@yandex.ru
Савин Дмитрий Валерьевич, инженер. E-mail: newchex2n@mail.ru
Сурудин Сергей Викторович, инженер, аспирант. E-mail: innosam63@gmail.com

Инкубационный период времени сохранения свежезакаленного состояния алюминиевого сплава при регламентированных нагревах под закалку должен быть использован для работ, требующих значительной пластической деформации, т.к. алюминиевый сплав в этот период времени характеризуется наиболее вязким и пластичным состоянием с возможной релаксацией напряжений. Инкубационный период времени может значительно увеличить за счет выдержки свежезакаленной листовой заготовки в холоде при температурах от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ перед формообразующей операцией [3].

Если деформация листовой заготовки при формообразовании протекает при таких условиях, например, в оттоженном равновесном состоянии, когда диффузионно-релаксационные процессы заторможены, то работой вязкого элемента можно пренебречь и рассматривать модель упругопластического тела с деформационным упрочнением. В свою очередь при других условиях, например, в метастабильном свежезакаленном состоянии, когда возможен самопроизвольный диффузионно-релаксационный процесс и во время деформации металл стремится «сбросить» структуру, формируемую в процессе этой деформации, то работой вязкого элемента нельзя пренебречь и необходимо рассматривать модель упруговязкопластического тела с релаксацией напряжений.

Для сравнения влияния различных реологических моделей поведения листового сплава Д16 в данной работе проводили моделирование процесса его обтяжки в программном комплексе ANSYS/LS-DYNA. Прежде всего, в состоянии упругопластического тела при деформационном упрочнении. В качестве реологической модели материала для заготовки была использована трехпараметрическая EPD-модель Барлата (3-Parameter Barlat Model) – модель, применяющаяся для моделирования алюминиевого листового материала с учетом анизотропии свойств в условиях плоского напряжённого состояния.

Для этой реологии материала необходимо было предварительно создать локальную систему координат, связанную с направлением прокатки листовой заготовки, а также с направлением обтяжки по касательной к формообразующему контуру оболочки. Такая касательная проходит через «полюс» оболочки с определением локальной формы поверхности через значение и знак гауссовой кривизны, например, оболочка двояковыпуклой формы с положительной гауссовой кривизной. Результаты моделирования приведены в работах [4, 5], где было уделено, прежде всего, внимание симметричной обтяжки за счет внешней симметрии формообразующего пуансона

на относительно плоскостей и направлений в «полюсе» оболочки к изометрическим линиям главных кривизн поверхности оболочки.

Была исследована кинематическая схема последовательной обтяжки в условиях симметричной обтяжки, совмещающая процессы обтяжки: предварительная обтяжка плоской заготовки на полный угол охвата формообразующего контура пуансона и последующая обтяжка оболочки изометрической формы, полученной после свободного разгибание с разверткой поверхности предварительно отформованной оболочки до определенного угла по формообразующему контуру пуансона.

Совмещение предварительной и последующей обтяжки, разъединенных разгрузкой и разгибанием с разверткой, а также изгибание оболочки с охватом обтяжного пуансона до полного прилегания ее поверхности к поверхности обтяжного пуансона обеспечивает возможность управления кинетикой «встречного» развития границ очага деформации в этих процессах и получение равномерного утонения оболочки двояковыпуклой формы [4]. Схема последовательной обтяжки реализуется на прессе, оснащенном системой автоматизации, например на прессе типа FEKD, за счет синхронного движения левого и правого балансиров с зажимами и стола пресса с установленным на нем обтяжным пуансоном (рис. 1). Положение пуансона определено на столе обтяжного пресса, обеспечивающее установку листовой заготовки в зажимы балансиров пресса. Создана расчетная модель обтяжки направленного изменения толщины листовой заготовки при формообразовании оболочки минимальной разнотолщинности, что позволяет увеличить степень формоизменения, практически за один переход при минимальной вероятности обрыва листовой заготовки на одном из свободных ее участков между краем пуансона и зажимами пресса.

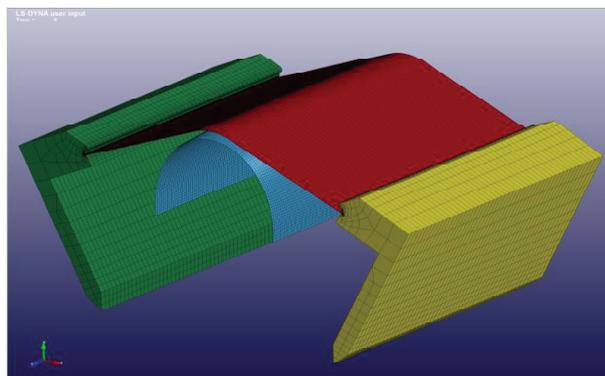


Рис. 1. Синхронные движения левого и правого балансиров с зажимами и стола пресса с обтяжным пуансоном на нем при реализации кинематической схемы последовательной обтяжки на прессе типа FEKD

Эта же кинематическая схема последовательной обтяжки в условиях симметричной обтяжки была исследована и в условиях другой реологической модели в состоянии упруговязкопластического тела: EVP-модель в состоянии упруговязкопластического тела (Elastic Viscoplastic Thermal Model) для моделирования деформации с учетом внутреннего трения, предполагающее, что материал упруговязкопластичен и имеется необратимый переход упругой энергии в тепло. Это определяет наличие релаксации напряжений, восстанавливающее нарушенное равновесие после деформации путем активации диффузии.

Результаты моделирования одной и той же кинематической схемы последовательной обтяжки в условиях приведенной внешней симметрии, но при различных реологических моделях приведены на рис. 2 и 3.

Для контроля и сопоставления изменений значений толщины листовой заготовки и эффективной деформации в направлении условного времени расчета кинематической схемы последовательной обтяжки, были выбраны характерные точки на поверхности оболочки: А (элемент 9751), В (элемент 5051) – на контуре центрального поперечного сечения, ближе к краю, и в «полюсе» оболочки и С (элемент 5072) D (элемент 5082), Е (элемент 5090) – на формообразующем продольном контуре вниз в сторону зажимов пресса, начиная с точки перехода криволинейной части контура на прямолинейную часть, в середине и в районе схода контура с пуансон (см. рис. 1 и 2).

При сравнении результатов моделирования по «цветной палитре» дискретных значений толщины листовой заготовки (рис. 2) и эффективной деформации (рис. 3) на отдельных этапах после-

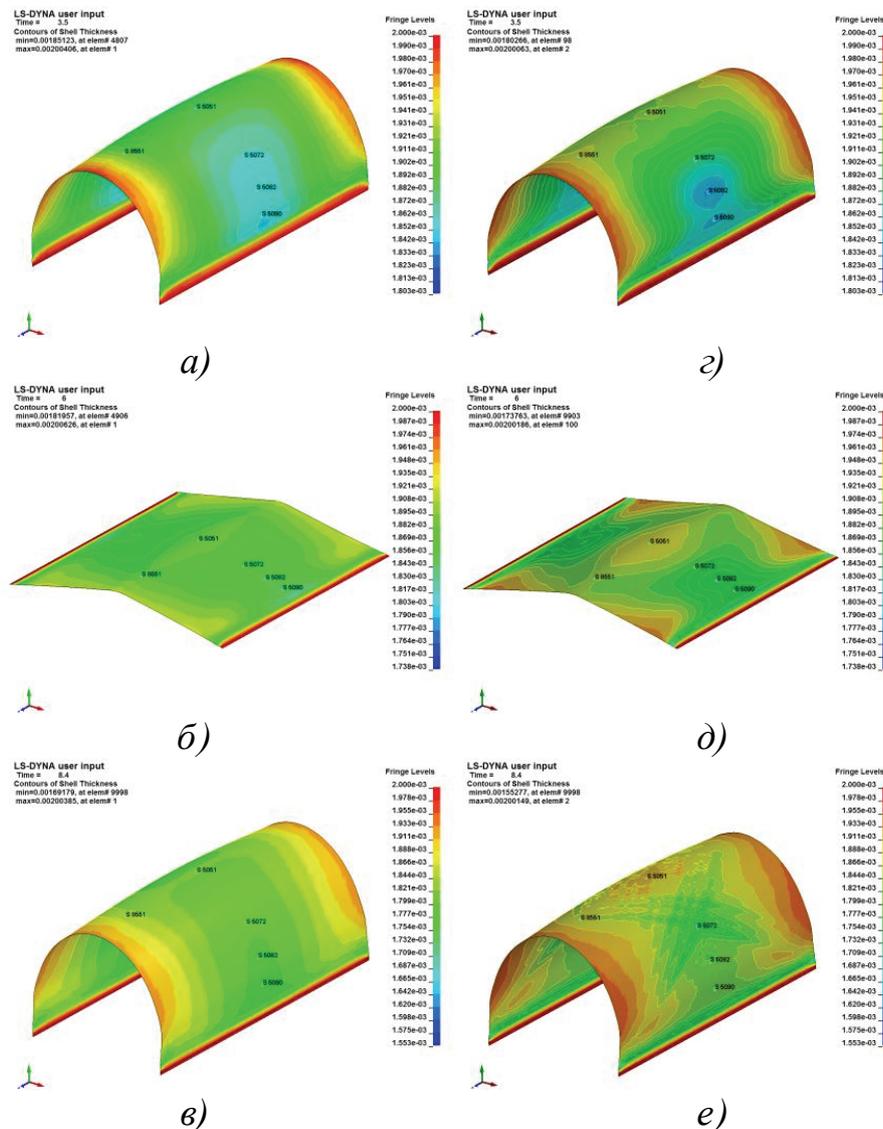


Рис. 2. Сравнение данных по толщине на следующих этапах: после первой обтяжки на угол 90° (а, г), после разгибания с разверткой детали на угол 12° и ее растяжения (б, д), в конце операции формовки (в, е); а, б, в – распределение толщины оболочки для EP-модели материала; г, д, е – распределение толщины оболочки для EVP-модели материала

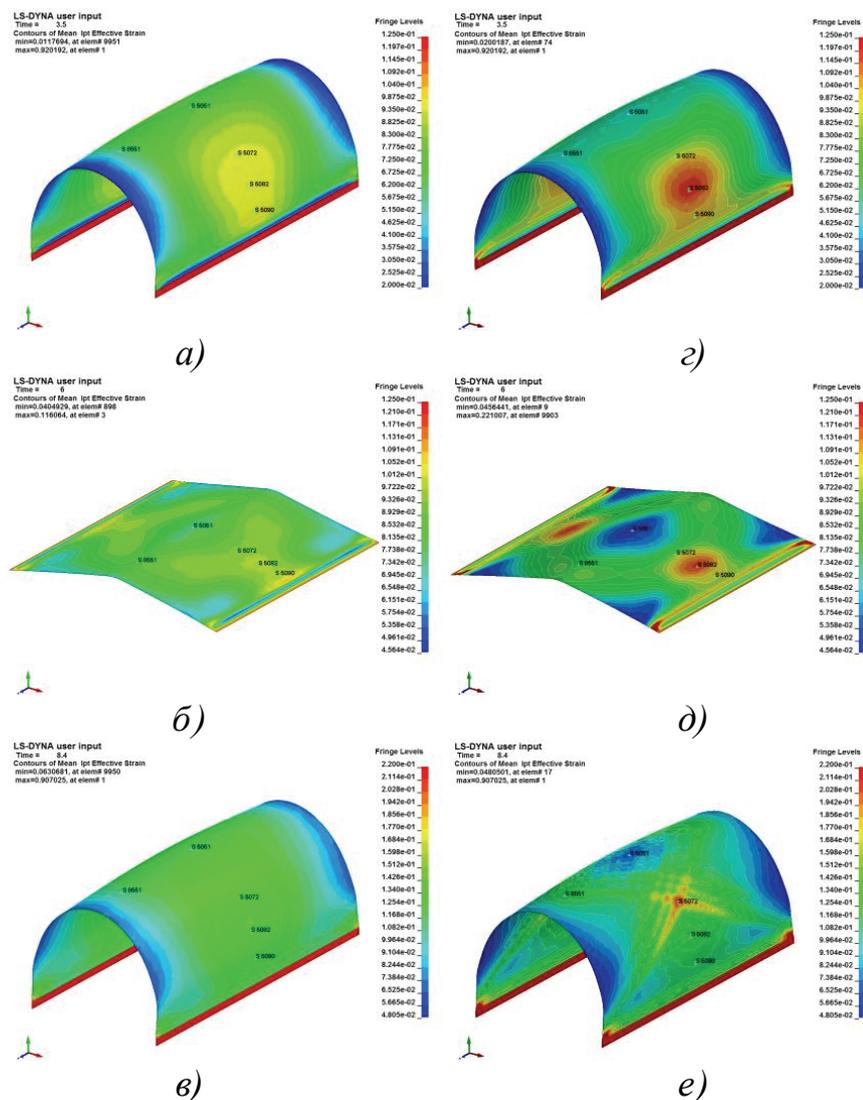


Рис. 3. Сравнение данных по эффективной деформации на следующих этапах: после первой обтяжки на угол 90° (а, г), после разгиба детали на угол 12° и ее растяжения (б, д), в конце операции формовки (в, е); а, б, в – распределение толщины оболочки для EP-модели материала; г, д, е – распределение толщины оболочки для EVP-модели материала

довательной обтяжки видно, что при осуществлении одной и той же кинематической схемы последовательной обтяжки картины по «цветной палитре» EP-модели и EVP-модели отличаются, прежде всего, наличием зоны локализации растяжения у материала в состоянии упруговязкопластического тела, а следовательно и утонения листовой заготовки в районе точки С (см. рис. 2е и 3е).

Реальная осуществимость обтяжки без локализации растяжения, в свою очередь, обусловлена свойствами симметрии листовой заготовки вообще и оболочки в частности. Совмещение направления касательной в «полюсе» оболочки к формообразующему контуру обтяжного пуансона с направлением обтяжки, а также с направлением прокатки листовой заготовки, в принципе может обеспечить при схеме последовательной обтяжки кинематическую управляемость процессом формообразования оболочки минимальной разнотолщинности. Однако результаты моделирования кинематической схемы последователь-

ной обтяжки листовой заготовки в состоянии упруговязкопластического тела указывают на отсутствие кинематической управляемости процессом формообразования оболочки минимальной разнотолщинности.

Это подтверждают графики изменения толщины (рис. 4) и эффективной деформации (рис. 5) в характерных точках поверхности оболочки: А, В, и С, D, Е. Графики развернуты в направлении условного времени расчета и включают в себя «ступеньки» изменения толщины листовой заготовки и эффективной деформации оболочки, соответствующие предварительному и последующему процессам обтяжки рассматриваемой кинематической схемы. Горизонтальные участки линий графиков соответствуют изгибанию или разгибанию листовой заготовки без деформации формообразования. Кинематическая схема последовательной обтяжки осуществляется без освобождения листа из зажимов за счет кинематических возможностей обтяжного пресса типа FEKD.

Если обратить внимание на правый край графиков (см. рис. 4а и 5а), где линии точек А, В, С, D и Е сходятся к значению толщины в диапазоне 1,805 - 1,825 мм и к значению эффективной деформации в диапазоне 0,130 - 0,135, что хорошо укладывается в допуски, определяемые требованиями к качеству деталей обшивок, то кинематическая управляемость процессом формообразования обтяжкой налицо. Если обратить внимание на правый край графиков (см. рис. 4б и 5б), где линии точек А, В, С, D и Е, наоборот расходятся, причем заметно выпадение линии точки С, что указывает на локализацию деформации растяжения и на локальное утонение листовой заготовки.

Это объяснимо с термодинамической точки зрения, что все многообразие механизмов и структурных уровней пластической деформации можно разделить на две наиболее характерные группы: адаптивные и диссипативные [6]. Поэтому в реальных условиях процесс пластического деформирования и разрушения рассматривается как конкуренция двух противоположных, взаимосвязанных и одновременно протекающих в деформируемых объемах факторов, одинаково необходимых для материала заготовки и обеспечивающих ее стационарное устойчивое реологическое состояние.

При этом первый фактор связан с деформационным упрочнением материала, а второй – с релаксационными эффектами, восстанавливающими нарушенное равновесие и сопровождающимся необратимым переходом упругой энергии в тепло. В этом и проявляется степень неопределенности в поведении деформируемого материала, что подчеркивает характер результатов моделирования течения материала в различных состояниях при распределении дискретных значений толщины листовой заготовки в процессе ее утонения (рис. 2) и распределении значений эффективной деформации (рис. 3) по повер-

ности формуемой оболочки на отдельных этапах последовательной обтяжки.

При анализе результатов моделирования проявились соответствия второй реологической модели с данными, полученными при натурном эксперименте, которые, позволяют объяснить возможный разрыв оболочки в результате потери устойчивости листовой заготовки в процессе формообразования, приводящего к локализации деформации растяжения (рис. 6). Возможный разрыв при формообразовании оболочки двойной кривизны чаще всего наблюдался в процессе обтяжки определенных листовых заготовок из партии, поставляемых к прессу после их закалки.

Объясняя приведенный факт возможного разрыва в процессе формообразования обтяжкой тем, что определенный лист в той или иной степени имеет способность поглощать механическую энергию (работу) при деформировании, которую, как правило, не учитывают на практике. Эта способность называется вязкостью, является функцией прочности и пластичности материала, имеет вероятностную природу и определяет долю «квазижидкой» фазы в структуре рассматриваемого материала.

Месторасположение возможного разрыва, приведенного на рис. 6, в той или иной степени имеет совпадение с поперечной линией, проходящей через точку С, указывающей на локализацию деформации растяжения в результатах моделирования упруговязкопластического состояния материала заготовки по EVP-модели (см. рис. 2, 3, 4 и 5).

Кроме того, если рассматривать распространение внешнего силового поля от зажимов прессы, то оно локализуется в средней части поверхности оболочки и район ее «полюса» (точка С) блокируется и не деформируется.

В этом случае деформационные волны распространяются навстречу друг другу от зажимов

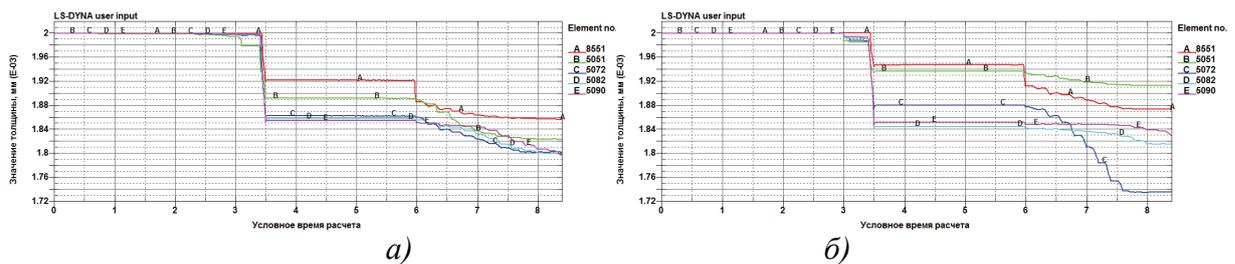


Рис. 4. Графики изменения толщины оболочки для EP-модели материала (а) и EVP-модели материала (б) в ее характерных точках

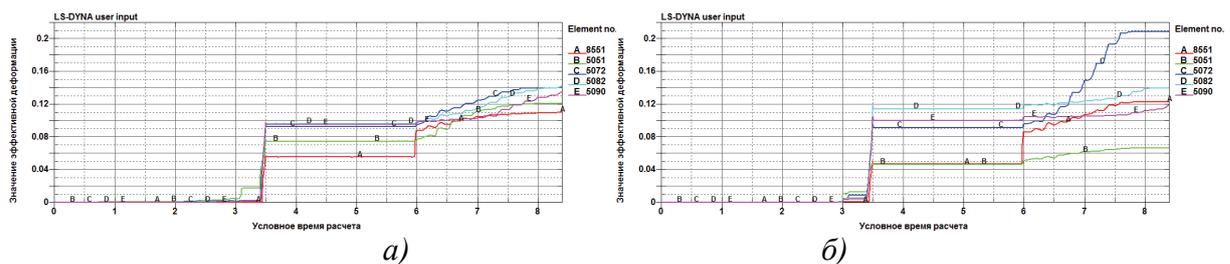


Рис. 5. Графики изменения эффективной деформации оболочки для EP-модели материала (а) и EVP-модели материала (б) в ее характерных точках

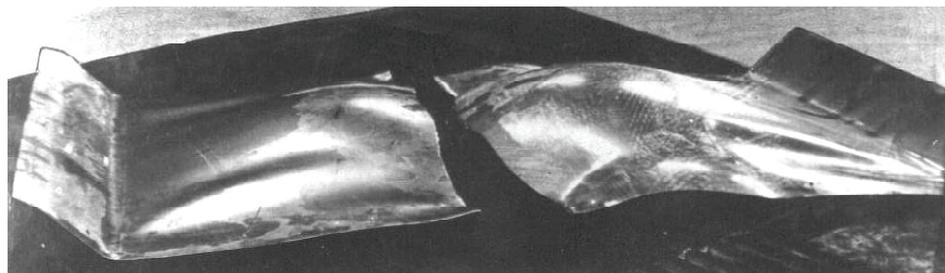


Рис. 6. Деталь оболочки двойной кривизны с возможным разрывом в процессе формообразования обтяжкой

пресса и от «полюса» оболочки. Встретившись в районе, совпадающей с поперечной линией, проходящей через точку D, эти деформационные волны образуют возможный равновеликий фронт, т.к. проходят, примерно, одинаковый путь от своих источников до момента встречи, где и наблюдается локализация растяжения, которая и приведет к возможному разрыву деформируемой заготовки. Это может произойти в результате релаксации напряжений в паузах между нагружениями, соответствующим процессам предварительной и последующей обтяжки. Таким образом, учет неравновесности металлической системы для описания упрочнения и релаксации напряжений дает возможность учесть практически все особенности реологического поведения листового металла в процессах формообразования обтяжкой, исследованные ранее экспериментально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Совершенствование процессов формообразования обтяжкой оболочек двойной кривизны / В.А. Михеев,

- А.Ф. Гречникова, А.А. Кузина // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. т. 13. №4 (42). С. 217-224.
2. Пластометрические исследования металлов / Н.А. Мочалов, А.М. Галкин, С.Н. Мочалов, Д.Ю. Парфенов. М.: Интермет Инжиниринг, 2003. 318 с.
3. Мельников А.А., Бунова Г.З. Технология термообработки алюминиевых полуфабрикатов: Учеб. Пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 128 с.
4. Моделирование последовательной схемы формообразования обтяжкой обводообразующих оболочек двойной кривизны минимальной разнотолщинности / В.А. Михеев, Ю.С. Ключков, А.А. Кузина, А.Ф. Гречникова, Д.В. Савин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 6-1. С. 260-267.
5. Выбор кинематической схемы формообразования обтяжкой обводообразующих оболочек сложной пространственной формы / В.А. Михеев, Ю.С. Ключков, А.А. Кузина, А.Ф. Гречникова, Д.В. Савин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 6-1. С. 253-260.
6. Колбасников Н.Г., Кондратьев С.Ю. Структура. Энтропия. Фазовые превращения и свойства металлов: научное издание. СПб.: Наука, 2006. 363 с.

ANALYSIS OF SEQUENTIAL SCHEME SHAPING OF SHELLS STRETCH FORMING DOUBLE-CONVEX FORM UNDER THE RHEOLOGICAL (MECHANICAL) PROPERTIES OF SHEET ALUMINIUM MATERIAL

© 2013 V.A.Miheev¹, F.V. Grechnikov¹, S.G.Dementyev², V.P.Samohvalov¹, D.V.Savin¹, S.V.Surudin¹

¹ Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

² "Aviastar-SP", Ulyanovsk

The effect of the visco-plastic medium on the stretch forming alloy D16, which was conducted using the program ANSYS / LS-DYNA. Created two rheological behavior of the material during plastic deformation, especially for anisotropic slab EPD model Barlata able elastic-plastic body under strain hardening, and as the next to freshly-slab EVP-model can elastoviscoplastic body. In the analysis of the simulation results were showed consistency with the experimental data, which, in principle, can explain the possible rupture of the shell due to the localization of thinning of the slab in the process of shaping is stretch forming.

Key words: shaping stretch forming, shells double-convex, rheological models, anisotropy of mechanical properties.

Vladimir Miheev, Doctor of Technics, Professor:

E-mail: vamicheev@rambler.ru

Fyodor Grechnikov, member-correspondent of RAS, Doctor of

Technics, Professor: E-mail: gretch@ssau.ru

Sergey Dementyev, General Manager.

E-mail: d002a@aviastar-sp.ru

Vladimir Samohvalov, Doctor of Technics, Professor:

E-mail: Volovik.Lud.@yandex.ru

Dmitriy Savin, Engineer. E-mail: newchex2n@mail.ru

Sergey Surudin, Engineer, Graduate Student.

E-mail: innosam63@gmail.com