

УДК 621.983.001

ВЫБОР КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОБТЯЖКОЙ ОБВОДООБРАЗУЮЩИХ ОБОЛОЧЕК СЛОЖНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОРМЫ

© 2012 В. А. Михеев¹, Ю. С. Клочков¹, А. А. Кузина¹, А. Ф. Гречникова², Д. В. Савин¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)
²ОАО «Самарский металлургический завод»

Выбор кинематической схемы формообразования обтяжкой обводообразующих оболочек сложной пространственной формы зависит от угловых значений, связанных с углом охвата обтяжного пуансона заготовкой и с углом разгиба оболочки между операциями последовательной обтяжки. Исследования выполнялись с помощью конечно – элементного анализа в программной среде ANSYS/LS-DYNA для оболочки с конкретными геометрическими характеристиками. По результатам исследования был осуществлён выбор одной из трёх кинематических схем.

Формообразование обтяжкой, обводообразующая оболочка, кинематическая схема, направленное изменение толщины оболочки.

Процесс обтяжки в отечественном авиастроении является основным способом формообразования оболочек двойной кривизны и имеет такие же преимущества, как и гибка с растяжением. В зависимости от характера приложения внешних сил процесс обтяжки на начальном этапе освоения в промышленности поделили условно на простую обтяжку (схема ОП) и обтяжку с растяжением (схема РО) [1]. Иногда эти схемы обтяжки называют соответственно поперечной и продольной. В свою очередь оболочки двойной кривизны разбиваются на ряд характерных групп, среди которых выделим только оболочки сложной пространственной формы. Это «крутые» оболочки со значительной кривизной в обоих направлениях двояковыпуклой формы изготавливаются на прессах типа ОП (рис. 1).

Простая обтяжка характеризуется тем, что усилие формообразования P прикладывается к пуансону, а растягивающие напряжения в листе возникают по широкой стороне заготовки за счёт сил реакции N неподвижных зажимов пресса. Простой обтяжкой изготавливаются изогнутые короткие оболочки значительной двойной кривизны двояковыпуклой формы с большими углами охвата $2\alpha_k$ до 180° . Обтяжные прессы типа ОП имеют горизонтальный стол с расположением зажимов вдоль его боковых (длинных)

сторон. В подавляющем большинстве эти прессы имеют подъёмный стол, путём перемещения которого и выполняется обтяжка при неподвижных зажимах (пресс ОП-3). Горизонтальный стол установлен на двух силовых гидроцилиндрах, осуществляющих его подъём.

Простая обтяжка не способна обеспечить получение обводообразующих оболочек минимальной разнотолщинности. Процесс формообразования обтяжкой листовой заготовки в оболочку двойной кривизны сопровождается неравномерным растяжением из-за влияния сил трения, неодинаковой деформацией по толщине и ограничивается локальным утонением листового материала на участке схода листовой заготовки с пуансона перед зажимными устройствами обтяжного пресса. Поэтому при проектировании процесса получения оболочки сложной пространственной формы одной из основных задач оставалась задача определения деформации допустимого утонения листового материала, определяемой наибольшей деформацией растяжения при обтяжке.

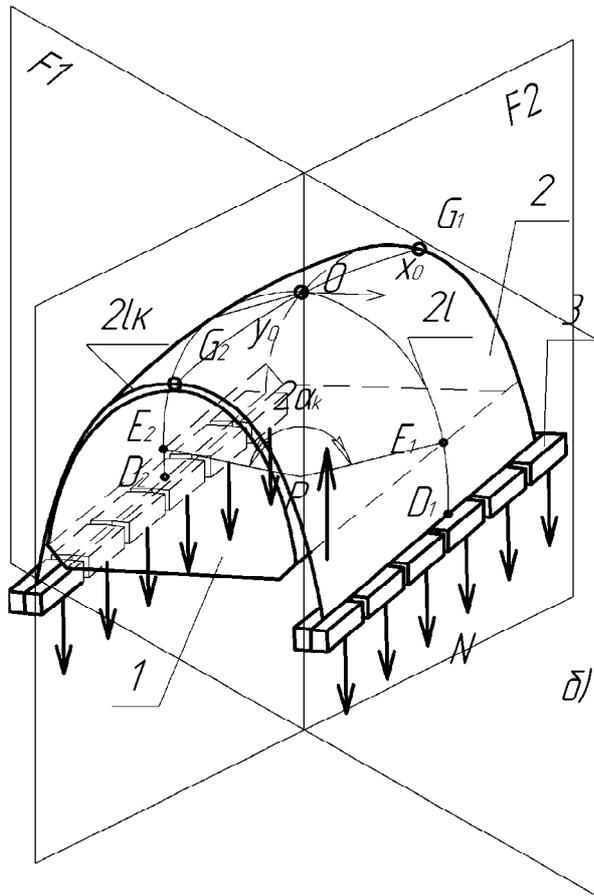


Рис. 1. Схема процесса простой обтяжки по обтяжному пуансону оболочки значительной двойной кривизны двояковыпуклой формы

1 - пуансон; 2 - заготовка; 3 - зажимы пресса

В последние годы фирмой АСВ (Франция) продолжают работы по созданию нового обтяжного оборудования, среди которых можно выделить прессы поперечного FET, продольного FEL и комбинированного FETL действий. На прессе FET имеются прямолинейные зажимные губки, расположенные горизонтально. Движение зажимных губок по определённой псевдотраектории осуществляется четырьмя гидроцилиндрами, из которых два горизонтальных, а два вертикальных. Эти гидроцилиндры образуют четыре шатуна переменной длины, шарнирно прикреплённые к общей станине пресса. При этом стол пресса FET выполнен неподвижным и установлен для удобства работы на уровне пола (рис. 2).

В результате относительных перемещений двух параллельных гидроцилиндров появляется возможность перемещать зажимные губки, как по прямой, так и под углом в пределах, определяемых действиями шатунного механизма. Восемь программируемых координат, образованных

перемещением штоков гидроцилиндров с каждой из сторон стола пресса одновременно управляются специальной системой программного управления с обратной связью. Обтяжные прессы с ЧПУ обеспечивают реализацию различных кинематических схем формообразования обтяжкой оболочки сложной пространственной формы. Выбор рациональных схем осуществляется в зависимости от геометрических параметров оболочки, предельного коэффициента обтяжки и типа обтяжного оборудования. Для этого задаётся траектория движения краёв заготовки, от которой существенно зависят технологические возможности процесса обтяжки, определяемые степенью неравномерности деформации растяжения в направлении обтяжки. При этом обеспечивается формоизменение заготовки по второй кривизне пуансона.

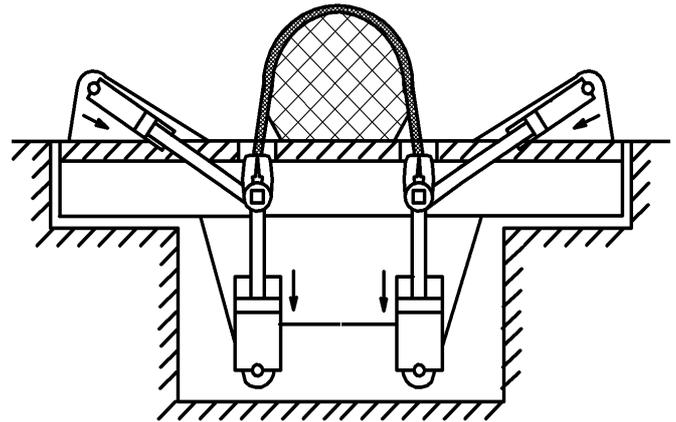


Рис. 2. Обтяжной пресс поперечного действия типа FET

Направленное изменение толщины заготовки при её формообразовании обтяжкой в оболочку с минимальной разнотолщинностью ведётся по последовательной схеме за счёт оптимального выбора угла охвата на первой операции обтяжки: либо с полного угла α_k , либо с угла α_1 до α_k ступенчатым нагружением. Изменение угла охвата на величину $\Delta\alpha_1$, например, в сторону увеличения вызывает дополнительную из-за внешнего трения деформацию растяжения заготовки вдоль границы контакта её с пуансоном, что с некоторого момента может привести к локализации деформации в свободном участке. Тогда формообразование второй кривизны в области центрального

сечения возможно лишь с определённого угла охвата α_1 .

Правильный подбор начального угла охвата α_1 должен обеспечить полное формообразование заготовки в центральном сечении, проходящим через точку O без локализации деформации в неуложенной ещё на пуансон части заготовки между сходом с пуансона и зажимами пресса. После предварительной обтяжки плоской заготовки с угла α_1 до полного угла охвата α_k наибольшая деформация будет в районе центрального сечения оболочки с гауссовой кривизной в точке O , значение которой K_o равно $k_{10} \cdot k_{20}$.

Гауссова кривизна K_o будет сохранять свое значение при изгибании поверхности оболочки в свободном от нагрузки состоянии, в то время как радиусы кривизны $R_1^{(o)}$ и $R_2^{(o)}$ при изгибании оболочки изменяются [1]. На основании приведённого свойства внутренней геометрии поверхностей сформировалось технологическое решение. Предлагается разгрузить оболочку после предварительной обтяжки и, не освобождая её из зажимов, осуществить разгиб оболочки на угол α_p за счёт движения зажимов пресса по расчётной траектории.

В результате получим так называемую изометрическую поверхность оболочки по отношению к поверхности обтяжного пуансона с радиусами кривизн в точке O соответственно $R_1^{(o)'}$ и $R_2^{(o)'}$, связанных соотношением при том же значении гауссовой кривизны K_o :

$$R_2^{(o)'} = \frac{1}{K_o \cdot R_1^{(o)'}} \quad (1)$$

где, если $R_1^{(o)}$ при разгибе на угол α_p увеличивается до $R_1^{(o)'}$, то $R_2^{(o)}$, наоборот, уменьшается до $R_2^{(o)'}$, а оболочка отступает от поверхности пуансона в районе центрального сечения на величину f_p . При последующей обтяжке оболочки с изометрической формой поверхности ступенчатым нагружением с угла α_p до α_k в результате трансформации очага

деформации из-за смены граничных условий обеспечивается растяжение краевых недеформированных участков заготовки и создаются условия выравнивания толщины заготовки в поперечном направлении [2,3].

Таким образом, к внутренним параметрам последовательной схемы формообразования обтяжкой относятся кинематические угловые значения, связанные с углом охвата обтяжного пуансона и с углом разгиба оболочки между операциями обтяжки. Выбор значений угловых параметров осуществляется с учётом следующего:

1. Учитывается локализация деформирующих сил в районе полюса обтяжного пуансона на первой операции обтяжки за счёт наличия плоских участков в районе схода заготовки с пуансона. В данном случае данную локализацию можно считать эффектом «прямого схода» заготовки, направленной в прямолинейный ряд корпусов зажимов. Поэтому угол охвата по первой причине выбран равным 90° с наличием поднутрения зажимного блока пресса.

2. Учитываются особенности формообразования центрального участка оболочки на начальной стадии первой операции обтяжки, на которой сохраняется локализация деформирующих сил в районе полюса обтяжного пуансона. Центральный участок оболочки характеризуется определёнными угловыми параметрами относительно полюса. Прежде всего, это угол α , который равен 18° , и угол β , равный 7° (рис. 3). Особенность центрального участка состоит в том, что он определяет геометрическую форму оболочки двойной кривизны.

3. Учитываются особенности оболочки двойной кривизны, связанные с тем, что ее поверхности при изгибании остаются неизменными, так же как её гауссова кривизна, хотя главные кривизны меняются обратно пропорционально. Например, при разгибе полученной при первой обтяжке оболочки двойной кривизны продольная кривизна уменьшается, а поперечная увеличивается (рис. 4). В результате при подводе обтяжного пуансона к данной форме оболочки локализация деформирующих сил

будет в центральном поперечном сечении. Расчёты, выполненные по формулам [1], позволяют определить значение угла разгиба, равное 12° для данной детали. В результате, формообразование обтяжкой полученного прогиба, определяющего положение полюса оболочки относительно обтяжного пуансона, позволит деформировать краевые участки аналогично тому, как деформировался полюс на первой операции.

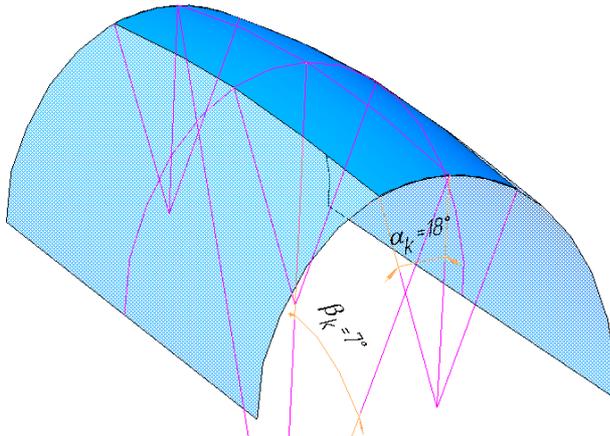


Рис. 3. Центральный участок оболочки

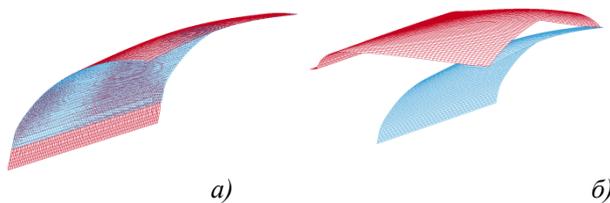


Рис. 4. Поперечный прогиб в центральной части оболочки в начале разгиба полученной при первой обтяжке оболочки двойной кривизны (а) и в конце разгиба на 12° (б)

Таким образом, проведённый анализ причин позволил сформировать три возможные кинематические схемы последовательной обтяжки, сочетающие в себе следующие силовые формообразующие операции.

Для первой кинематической схемы: обтяжка цилиндрической заготовки с углом охвата пуансона 90° ; разгиб детали от 90° до 12° по контуру края пуансона и растяжение детали под углом 12° ; загиб детали без разгрузки по формообразующему контуру пуансона с одновременным растяжением детали.

Для второй кинематической схемы: обтяжка цилиндрической заготовки с углом охвата пуансона 18° ; разгиб детали от 90°

до 12° по контуру края пуансона и растяжение детали под углом 12° ; загиб детали без разгрузки по формообразующему контуру пуансона.

Для третьей кинематической схемы: обтяжка цилиндрической заготовки с углом охвата пуансона 90° ; разгиб детали от 90° до 12° по контуру края пуансона и растяжение детали под углом 12° ; свободный загиб детали по формообразующему контуру пуансона; калибровочная обтяжка детали с углом охвата пуансона 90° .

Для первичного анализа результатов численных экспериментов, проведённых с помощью программы ANSYS/LS-DYNA для каждой из трёх кинематических схем, получены следующие данные, которые соответствуют различным значениям коэффициентов трения (0,05, 0,1, 0,2) при обтяжке анизотропной заготовки с коэффициентами поперечной деформации $\mu_{21} = 0,36, \mu_{21} = 0,39, \mu_1 = 0,51$ и $\mu_{21} = 0,51, \mu_{21} = 0,51, \mu_1 = 0,39$:

- распределение эффективных деформаций по средней поверхности оболочки на этапах после первой обтяжки на угол 90° или 18° , после разгиба детали на угол 12° и её растяжения, в конце операции формовки;

- распределение толщины оболочки на приведённых ключевых этапах;

На рис. 5-7 приведены наилучшие варианты результатов численных экспериментов для каждой рассматриваемой кинематической схемы.

Численный эксперимент 1

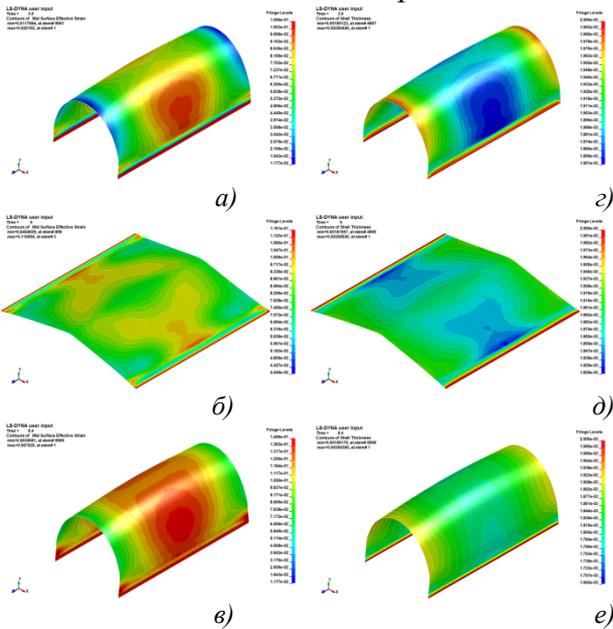


Рис. 5. Распределения данных эксперимента 1 из первой кинематической схемы на следующих этапах: после первой обтяжки на угол 90° (а, з), после разгиба детали на угол 12° и ее растяжения (б, д), в конце операции формовки (в, е); а, б, в - распределение эффективных деформаций по средней поверхности оболочки; з, д, е - распределение толщины оболочки

Численный эксперимент 14

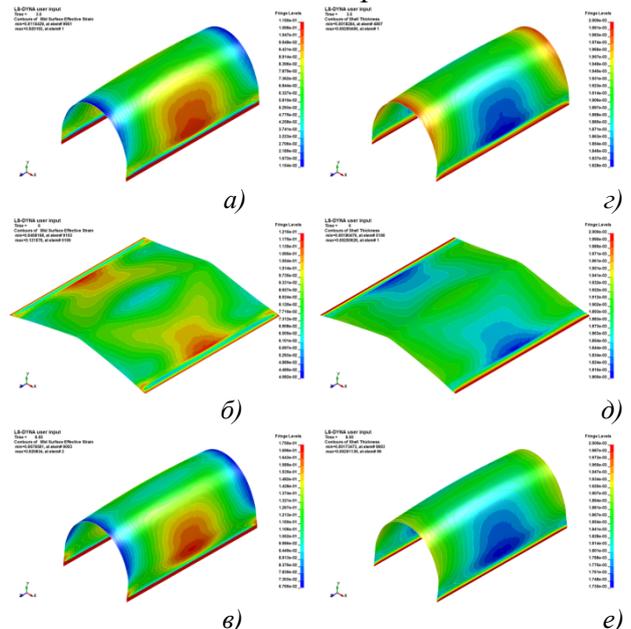


Рис. 7. Распределения данных эксперимента 14 из третьей кинематической схемы на следующих этапах: после первой обтяжки на угол 90° (а, з), после разгиба детали на угол 12° и ее растяжения (б, д), в конце операции формовки (в, е); а, б, в - распределение эффективных деформаций по средней поверхности оболочки; з, д, е - распределение толщины оболочки

Численный эксперимент 8

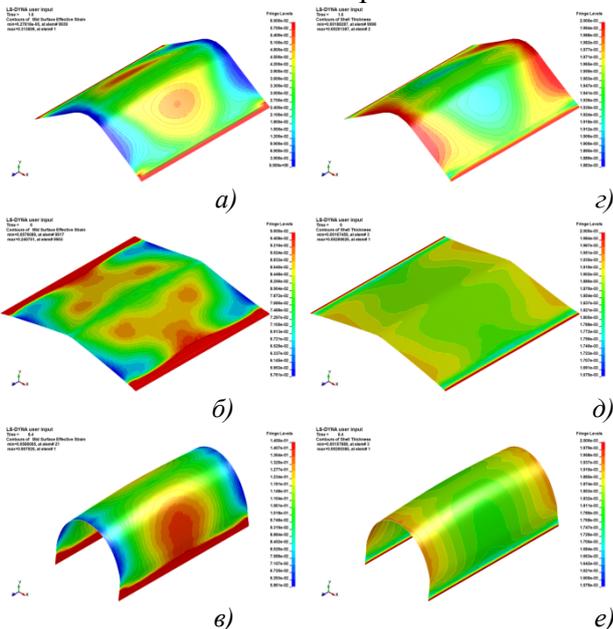


Рис. 6. Распределения данных эксперимента 8 из второй кинематической схемы на следующих этапах: после первой обтяжки на угол 18° (а, з), после разгиба детали на угол 12° и ее растяжения (б, д), в конце операции формовки (в, е); а, б, в - распределение эффективных деформаций по средней поверхности оболочки; з, д, е - распределение толщины оболочки

Исследованы три кинематические схемы, которые отличаются друг от друга маршрутом технологических операций. Каждая из данных кинематических схем имеет свой набор силовых этапов формообразования и этапов свободного загиба или разгиба концов листовой заготовки. Кроме того, определены количественные значения угловых параметров той или иной кинематической схемы.

Выполнен анализ величин коэффициента трения между заготовкой и обтяжным пуансоном и показателей анизотропии листовой заготовки и их изменений в технологически обоснованном интервале. Коэффициент трения принимал следующие значения: 0,05, 0,1 и 0,2. Показатели анизотропии соответствовали «менее» текстурованному ($\mu_{21} = 0,36, \mu_{21} = 0,39, \mu_1 = 0,51$) и «более» текстурованному ($\mu_{21} = 0,51, \mu_{21} = 0,51, \mu_1 = 0,39$). В результате был сформирован комплекс численных экспериментов с учётом числа кинематических схем, коэффициентов

трения и типов материалов в зависимости от степени текстурованности.

Было выполнено 18 численных экспериментов, которые позволили выявить оптимальную кинематическую схему формообразования обтяжкой оболочки двойной кривизны. Спрогнозирована вероятность появления дефектов оболочки в виде опасных мест по степени деформации и возможному гофрообразованию по поверхности.

Проведённые численные эксперименты дают полную информацию о распределении толщин оболочки в виде дискретных значений в том или ином элементе. Как результат, появилась возможность провести статистическую обработку этой информации, выявить характер распределения и размах прогнозируемых величин и провести сопоставление с

применяемым на авиационных предприятиях допуском на разнотолщинность обшивки.

Библиографический список

1. Филин, А.П. Элементы теории оболочек [Текст] / А.П. Филин. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 384 с.

2. Михеев, В.А. Направленное изменение толщины заготовки при формообразовании обтяжкой обводообразующих оболочек двойной кривизны [Текст] / В.А. Михеев // МНТК Проблемы и перспективы развития двигателестроения. – Самара: СГАУ, 2003. – с. 91.

3. Михеев, В.А. Совершенствование процессов формообразования обтяжкой оболочек двойной кривизны [Текст] / В.А. Михеев, А.Ф. Гречникова, А.А. Кузина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2011. – Т.13, №4 (42). - С. 217 – 224.

THE CHOICE OF THE KINEMATIC SCHEME OF FORMOOBRAZOVANY BY STRETCH FORMING OF OBVODOOBRAZUYUSHCHY COVERS OF THE DIFFICULT SPATIAL FORM

© 2012 V. A. Miheev¹, Y. S. Klochkov¹, A. A. Kuzina¹, A. F. Grechnikova², D. V. Savin¹

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

²ОАО "Samara Metallurgical Plant"

The choice of the kinematic scheme of formoobrazovany by stretch forming of obvodooobrazuyushchy covers of a difficult spatial form depends on the angular values connected with a corner of coverage of an obtyazhny punch by preparation and with a corner of unbending of a cover between operations of consecutive covering. Researches were carried out by means of the final and element analysis in the program ANSYS/LS-DYNA environment for a cover with concrete geometrical characteristics. By results of research the choice of one of three kinematic schemes was carried out.

Formoobrazovaniye by stretch forming, obvodooobrazuyushchy cover, the kinematic scheme, the directed change of thickness of a cover.

Информация об авторах

Михеев Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: vamicheev@rambler.ru. Область научных интересов: исследование возможности получения обтяжкой оболочек двойной кривизны минимальной разнотолщинности.

Клочков Юрий Сергеевич, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, доктор технических наук, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: pnn@ssau.ru. Область научных интересов: управление процессами, статистические методы оценки качества.

Кузина Антонина Александровна, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: KuzinaAntonina@mail.ru. Область научных интересов: исследование процесса обтяжки оболочек двойной кривизны.

Гречникова Анна Фёдоровна, ведущий инженер-технолог, ОАО «Самарский металлургический завод». E-mail: anna_gr17@yahoo.com. Область научных интересов: деформирование анизотропных материалов.

Савин Дмитрий Валерьевич, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: newchex2n@mail.ru. Область научных интересов: компьютерное моделирование.

Miheev Vladimir Aleksandrovich, Doctor of Technical Science, professor, Head of the Department of the technology of metals and aviation materials science, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: vamicheev@rambler.ru. Area of research: research of possibility of receiving by covering of covers of double curvature of the minimum raznotolshchinnost.

Klochkov Yuri Sergeyeitch, associate professor of the Department of aircraft construction and quality management in mechanical engineering, Doctor of Technical Science, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: pnn@ssau.ru. Area of research: process management, statistical methods of assessing quality.

Kuzina Antonina Aleksandrovna, the post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: KuzinaAntonina@mail.ru. Area of research: research of process of covering of covers of double curvature.

Grechnikova Anna Fedorovna, the leading process engineer of ОАО "Samara Metallurgical Plant". E-mail: anna_gr17@yahoo.com. Area of research: anisotropic materials deforming.

Savin Dmitry Valeryevich, student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: newchex2n@mail.ru. Area of research: computer modeling.