

## ДЕФОРМАЦИЯ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ОБТЯЖКОЙ ОБОЛОЧЕК СЛОЖНЫХ ФОРМ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ

© 2004 В.А. Михеев

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрены вопросы получения качественных оболочек сложных форм в связи с изменением свойств материала заготовки в процессе их изготовления. Определен уровень оптимальной деформации растяжения за переход, что позволяет создать соответствующие эксплуатационные характеристики с учетом технологической наследственности. Процесс обтяжки оболочек сложных форм успешно реализуется при вполне определенных значениях показателей анизотропии, полученных заготовкой при прокате и термообработке, а также за счет совпадения направления обтяжки с направлением главных кривизн поверхности оболочки.

Процесс формообразования обтяжкой листовых обшивочных деталей сложных пространственных форм является, как правило, многопереходным. Поэтому в процессе их изготовления изменяются свойства материала заготовки, а получение соответствующих эксплуатационных характеристик деталей определяется технологической наследственностью.

Технологической наследственностью считается явление переноса свойств заготовки, сформировавшихся на предшествующих операциях, на последующие операции при изготовлении деталей. Проявление технологической наследственности может привести как к улучшению, так и к ухудшению эксплуатационных характеристик детали. Типичной операцией, задерживающей или исключаящей передачу наследственных свойств, является термическая обработка.

Известно, что носителями наследственной информации, является собственно металл заготовки, а его свойства определяются наличием в металле преимущественных кристаллографических ориентировок. Поэтому получение в листе требуемого для обтяжки набора показателей анизотропии зависит от параметров текстуры, полученной при прокатке и термообработке. Видоизменяясь в зависимости от режимов этих процессов, текстура определяет уровень свойств металла и характер анизотропии.

Необходимо также отметить, что текстурирование связано с дислокационной структурой металла. Появившиеся при деформации дислокационные комплексы создают внутренние напряжения, которые являются движущей силой структурных превращений при термической обработке. Последующая перестройка структуры при нагреве приводит к росту зерен металла.

Для практики обтяжных работ весьма желательно, чтобы листовая материал, подвергаемый холодному пластическому деформированию, имел высокий уровень технологической деформируемости. Это определяется способностью листового материала принимать сложную форму детали при пластическом деформировании без нарушения сплошности и потери устойчивости при заданном уровне механических свойств и качестве поверхности.

Однако отсутствие данных о технологическом наследовании и назначение режимов обработки на базе справочных данных даже для хорошо известных сплавов привело к появлению большого количества брака, что имело место при обтяжке оболочек двойной кривизны из сплава Д16чАМ. Было установлено, что из-за значительной неравномерности деформации при обтяжке оболочек сложной формы вероятность появления брака, связанного с превышением допустимого утонения листовой заготовки и допустимого раз-

мера зерен металла, увеличивается.

Известно, что многие эксплуатационные характеристики детали зависят от уровня разнотолщинности и размера зерен металла. Допустимое утонение листовой заготовки, установленное для обшивочных деталей в пределах 20-ти процентов, резко ограничило возможности процессов обтяжки оболочек сложных форм [1]. Установлены допустимые размеры зерен металла в пределах 30...50 мкм, которые обеспечивают высокие эксплуатационные характеристики [2].

Поэтому для практических целей важно установить не только качественные, но и количественные связи технологического наследования. На рис. 1 показана структурная модель многофакторного технологического процесса формообразования листового материала в случае взаимосвязи нескольких технологических систем: например, прокатки ТС1, термообработки ТС 2 и обтяжки ТС3.

Из рис. 1 видно, что часть выходных параметров предшествующей системы являются входными параметрами последующей системы, что наглядно демонстрирует явление технологической наследственности. Для целесообразного использования явления технологической наследственности необходимо установить непосредственные связи между эксплуатационными характеристиками деталей и режимами технологических процессов.

Анализ многочисленных исследований холодной прокатки и последующего отжига листов показывает, что их структура и свойства определяются не только составом сплава, степенью обжатия и температурой отжига, но и взаимным влиянием этих факторов [3]. Иначе говоря, характер формирования текстуры и связанной с ней анизотропия свойств

определяется внутренней энергией, величина которой характеризуется совокупным действием энергии деформации и теплоты.

Следовательно, полное представление о формировании и развитии анизотропии, как и других свойств листового материала, можно получить лишь при изучении совместного влияния на нее параметров прокатки и отжига. В результате можно сформировать в них различную степень анизотропии свойств в зависимости от схемы последующего деформирования листовой заготовки в деталь.

В работе [4] исследованы закономерности формирования анизотропии свойств в зависимости от сочетания режимов прокатки и термообработки листов. Суть исследования состоит в назначении температуры отжига и времени выдержки холоднокатаных листов в соответствии с величиной обжатия, полученной металлом при холодной прокатке листов. Причем величина обжатия не должна превышать критических значений. В противном случае нельзя получить благоприятные для формообразования обтяжкой сочетания показателей анизотропии при отжиге листов. В частности для листов из сплава Д16, применяемых при обтяжке, рекомендован окончательный отжиг 410<sup>0</sup>С при достаточно продолжительной выдержке. При этом получаются следующие сочетания показателей плоскостной анизотропии:  $\mu_{21} > \mu_1 > \mu_{12}$  или  $\mu_{12} > \mu_1 > \mu_{21}$ , что обеспечит увеличение предельной деформации металла при обтяжке, где  $\mu_{12}$ ,  $\mu_{21}$  и  $\mu_1$  – показатели поперечной деформации листового материала (показатели анизотропии):  $\mu_{21}$  – направление проката,  $\mu_{12}$  – поперек проката,  $\mu_1$  – под углом

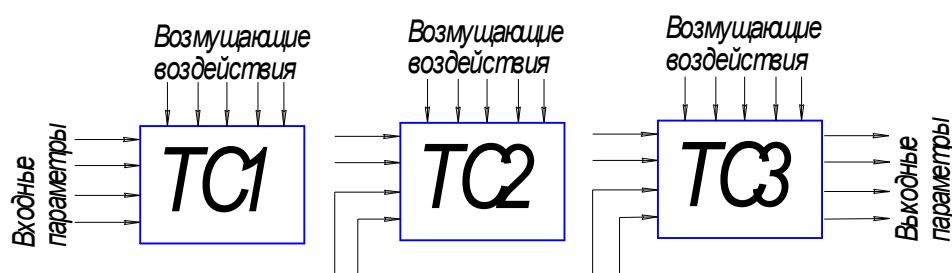


Рис. 1. Структурная модель многофакторного технологического процесса формообразования листового материала

45° к осям 1 и 2 (главные оси анизотропии листового проката).

Поэтому для процесса обтяжки необходимо применять листовые материалы, полученные путем прокатки с высокими степенями обжатия больше 70 процентов. Кроме этого подтверждена идентичность плоскостной анизотропии для обоих металлов: основного Д16 и плакировочного АД0.

Для представления детерминированности технологической системы обтяжки получения в листовой заготовки необходимых сочетаний показателей анизотропии не достаточно. В работе [4] показано, что способность текстурированного металла к пластическому деформированию является резко анизотропной. Особенно влияние анизотропии проявляется при устойчивой связи между утонением и показателями анизотропии. Тогда соотношение между деформациями можно изменить в пользу той, увеличение которой приведет к повышению допустимого утонения листовой заготовки при формообразовании обтяжкой.

Для этого рассмотрим схему обтяжки оболочки двойной кривизны (рис. 2), форма которой характеризуется коэффициентом обтяжки  $K_{обт}$ :

$$K_{обт} = \frac{l_{max}}{l_{min}}; \tag{1}$$

где  $l_{max}$  и  $l_{min}$  – соответственно длина развертки формообразующего контура  $OD_1(OD_2)$  и длина развертки кривого контура  $AB_1(AB_2)$  оболочки влево или вправо от точки  $O$

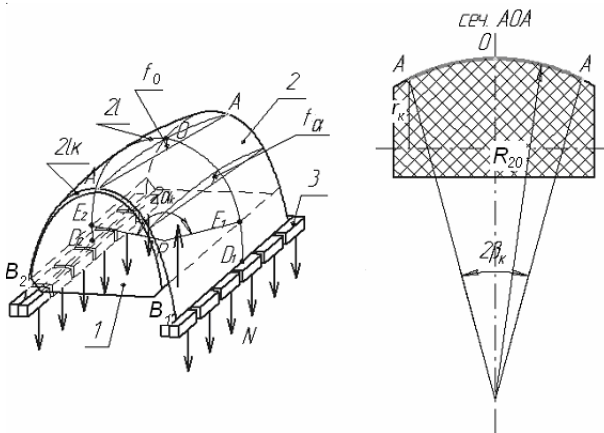


Рис. 2. Схема обтяжки по обтяжному пуансону 1 заготовки 2, удерживаемой в зажимах пресса 3

относительно сечения  $AOA$  (рис. 2).

В зависимости от величины  $K_{обт}$  процесс обтяжки ведут за один или несколько переходов. Неравномерность деформации в результате действия сил трения может быть оценена по формуле:

$$e_1^{(E)} = e_1^{(O)} \cdot \exp\left(\frac{\mu \alpha_k}{n}\right), \tag{2}$$

где  $e_1^{(E)}$  и  $e_1^{(O)}$  – значения деформации в точках  $O$  и  $E_1(E_2)$  в направлении обтяжки;

$\mu$  – коэффициент трения;

$n$  – показатель упрочнения материала заготовки.

Коэффициент обтяжки должен учитывать и влияние сил трения. Однако, даже при создании идеальных условий полного отсутствия сил трения, когда  $\mu$  равен 0, а деформации  $e_1^{(O)}$  и  $e_1^{(E)}$  будут равны между собой, неравномерность деформации остаётся существенной из-за значительной двойной кривизны оболочек сложной формы. Другими словами, деформации  $e_1^{(O)}$  и  $e_1^{(A)}$  будут отличаться. Причем  $e_1^{(O)}$  будет наибольшей, характеризуемой прогибом  $f_0$  и значением гауссовой кривизны:

$$k_0 = \frac{1}{R_{1O}} \cdot \frac{1}{R_{2O}}. \tag{3}$$

Далее гауссова кривизна в сечениях оболочки уменьшается от наибольшего в центральном сечении  $AOA$  до нулевого значения под углом  $\alpha_k$ . Наряду с  $K_{обт}$  введем геометрический коэффициент  $K_r$ , определяемый по формуле:

$$K_r = 1 + e_{1O}, \tag{4}$$

где  $e_{1O}$  – деформация в точке  $O$ , определяемая из геометрических параметров сечения  $AOA$  плюс минимальная деформация в для вывода за предел текучести всех участков заготовки, в том числе краевого участка в районе точки  $A$ :

$$e_{1O} = \frac{R_{2O}(1 - \cos \beta_k)}{r_{кА}} + e_{1A}. \tag{5}$$

Полученные значения неравномерности деформации могут значительно превосходить величину равномерного удлинения материала заготовки  $\delta_p$ . Тогда предельные возможности процесса обтяжки будут ограничены потерей устойчивости пластического деформирования, которая сопровождается локализацией деформации на одном из свободных участков листовой заготовки. Поэтому усилия многих исследователей были направлены на разработку способов формообразования обтяжкой, снижающих степень неравномерности деформации. Способы, в основном, были связаны с изменением угла охвата  $\alpha_k$  по переходам за счет однонаправленного смещения зажатых краев заготовки относительно формообразующего контура пуансона, проходящей в нашем случае через точку  $O$ .

В результате потребовались способы, реализация которых не всегда определяются кинематическими возможностями обтяжного оборудования. Выполненная модернизация обтяжного оборудования типа ОП приблизила к схеме обтяжки, реализующей равномерное деформирование листовой заготовки, но это не решило проблемы технологической наследственности.

Технологический процесс изготовления деталей оболочек сложных форм должен разрабатываться с учетом технологической наследственности так, чтобы получить у детали положительные качества. Технологическая наследственность проявляется на всех этапах реализации технологических процессов и связана с изменением свойств материала при прокатке, обтяжке, промежуточной и окончательной термической обработке.

Поэтому в качестве факторов ограничивающих предельные возможности процесса обтяжки приводится либо деформация  $e_{пред}$  предельно допустимого формоизменения листовой заготовки либо критическая деформация  $e_{кр}$ , в результате которой происходит рекристаллизация и разупрочнение металла.

Кроме того, из-за значительной двойной кривизны поверхности оболочки, напряжения распределяются неравномерно. В то время как в одних участках заготовки растяги-

вающие напряжения уже достигли пластической деформации и увеличиваются с учетом упрочнения материала, в других – будут только превышать его предел текучести и далее деформироваться при других граничных условиях. По толщине в сечениях заготовки действуют напряжения только одного знака – растягивающие, что должно обязательно снизить влияние упругих деформаций.

Тогда после снятия нагрузки все сечения оболочки должны упруго сжаться на одинаковую величину – упругой деформации от растяжения. Однако одни участки заготовки, например краевые, успевают разгрузиться, а другие – центральные участки из-за жесткости краевых не успевают разгрузиться полностью. Поэтому будут иметь место остаточные упругие напряжения и деформации, которые приведут к некоторому искажению формы поверхности оболочки. Чем значительнее двойная кривизна оболочки, тем больше искажение ее формы. Тогда доводочные работы при изготовлении таких деталей будут неизбежны. В связи с этим необходимо определить минимальное значение деформации  $e_{min}$  с учетом снижения искажения формы оболочки, до уровня, определяемого точностью образования обводов летательного аппарата.

Наряду с искажением формы оболочки отклонения в точности обводов зависят от отклонения толщины детали обшивки. Дополнительные требования по минимальной толщине обшивочной детали и разнотолщинности привело к необходимости определения деформации  $e_{дон}$  допустимого утонения листовой заготовки. От её правильного расчёта зависит как эксплуатационные характеристики детали, а при условии равномерного деформирования – возможность более полного использования деформационных возможностей листового материала.

В этом случае равномерное изменение толщины листовой заготовки должно осуществиться при сочетании способов обтяжки в одном переходе формообразования, а также при наличии рациональных показателей анизотропии механических свойств материала листовой заготовки, полученных в процессе

прокатки [6].

Итак, более детальный анализ определил четыре уровня деформации:  $e_{кр}$ ,  $e_{мин}$ ,  $e_{доп}$ ,  $e_{пред}$ . Учитывая их комплексно, можно сформировать в листовой заготовке необходимые свойства, которые после её формообразования обтяжкой обеспечат высокие эксплуатационные характеристики детали. Рассмотрим подробнее эти значения деформаций с учётом технологической наследственности.

### Критическая деформация рекристаллизации

Установленные значения критической деформации  $e_{кр}$  при размерах зерна 30-50 мкм относятся к основному металлу Д16, а не к плакирующему слою из АД0. Именно в плакирующем слое после нагрева под отжиг или закалку появляются более крупные зерна, чем в основном металле. Основной причиной возникновения крупнокристаллической структуры является “критическая” рекристаллизация. Этот процесс сопровождается интенсивным ростом зерна в результате термообработки после холодной деформации с критическими степенями.

Величины критической деформации  $e_{кр}$  в плакирующем слое и основном металле имеют разные значения, при этом меньшей бывает величина критической деформации в плакирующем слое. Для отожденного сплава Д16 по справочным данным критические деформации лежат в пределах 10...12%, а для отоженного холоднокатаного алюминия АД0 – 4...6% [2].

В этом случае получить требуемую степень формоизменения заготовки при обтяжке за минимальное количество промежуточных отжигов можно за счет критического деформирования плакирующего слоя и назначения режимов термообработки. Мелкое зерно стабильно получается при температуре закалки, которая выше температуры отжига.

Было установлено, что условия отжига и деформация правки растяжением листов на линии ЛНТО не обеспечивают удовлетворительной технологической деформируемости и процесс обтяжки сопровождается появле-

нием крупнокристаллической структуры в плакирующем слое.

Величина критической деформации  $e_{кр}$  и размеры зерна зависят от легирующих добавок в плакирующий металл и технологической наследственности листового проката. Исследования показали, что введением добавки титана можно не только измельчить зерно в плакирующем слое, но и сдвинуть критическую деформацию в область более высоких значений, соответствующих основному сплаву.

Влиянию технологической наследственности листового проката на технологическую деформируемость при его холодной штамповке посвящена работа [3]. В ней показано, что при вторичной рекристаллизации растут зерна преимущественно только одной кристаллографической ориентации. Вследствие этого текстура вторичной рекристаллизации может отличаться от текстуры деформации. Это создает условия для управления величиной  $e_{кр}$  за счет резко выраженной анизотропии механических свойств.

Приведенные в работе [3] закономерности изменения показателей анизотропии в зависимости от сочетания режимов прокатки и отжига полностью подтверждаются рентгеноструктурными исследованиями. Дальнейшие исследования влияния технологической наследственности на режимы холодной штамповки показали, что для листов, прокатанных с высокими степенями деформации, температура, необходимая для “критической” рекристаллизации, значительно повысится относительно температур промежуточного отжига при обтяжке.

Поэтому на практике установлено, что лучшей совокупностью свойств для формообразования обтяжкой обладают листы с резко выраженной анизотропией свойств в плоскости листа, причем в сторону максимальных значений показателей анизотропии  $m_{12}$  и  $m_{21}$ .

Кроме того, наиболее характерными технологическими проявлениями является зависимость интенсивности утонения от анизотропии листового материала, определяющая допустимую деформацию по толщине при формообразовании обтяжкой.

### Деформация допустимого утонения

Текстура а, следовательно, и анизотропия свойств листового материала, как уже было отмечено, формируется во всех звеньях технологического цикла. При проектировании процесса листовой штамповки одной из важнейших задач является определение допустимого утонения листовой заготовки. От ее правильного расчета зависят как эксплуатационные параметры детали, так и возможность более полного использования деформационных возможностей материала заготовки.

Как показано еще С.И. Губкиным, допустимая деформация материала в любом процессе определяется, прежде всего, схемой напряженно-деформированного состояния, в условиях которой он находится. Известно также, что в операциях листовой штамповки напряженное состояние характеризуется показателем напряженного состояния  $v_\sigma$  или связанным с ним показателем деформированного состояния  $v_e$ .

Если заготовка считается изотропной, то показатели напряженного  $v_\sigma$  и деформированного  $v_e$  состояний равны. Для анизотропного состояния существует следующая взаимосвязь между  $v_\sigma$  и  $v_e$  в зависимости от схемы напряжений при обтяжке ( $ss_1 \gg ss_3$  и  $ss_2 = ss_{cp}$ ):

$$v_e = \frac{(D_2 - v_\sigma)}{D_2 \cdot v_\sigma - C_2}, \quad (6)$$

где  $D_2 = 2\mu_{12} - 1$ ;  $C_2 = 1 - 4\mu_{12} + 4\frac{\mu_{12}}{\mu_{21}}$ .

Из выражения (6) следует, что благоприятное для повышения допустимого формоизменения деформированное состояние при обтяжке может быть получено тремя путями:

- обеспечением процесса обтяжки новыми схемами формообразования;
- получением в заготовках необходимых сочетаний показателей анизотропии  $m_{12}$  и  $m_{21}$ ;
- совпадением направлений главных де-

формаций с кристаллографической ориентировкой исходной заготовки и плоскостями симметрии поверхности обтяжного пуансона.

В работе [5] показано, что способность текстурованного металла к пластическому деформированию является резко анизотропной, особенно влияние анизотропии проявляется при обтяжке листовых заготовок, где наблюдается устойчивая связь между утонением с показателями анизотропии в условиях симметричного формообразования.

Выбор направления обтяжки согласован с плоскостями симметрии поверхности обтяжного пуансона  $F_1$  и  $F_2$ , совпадающими с направлениями главных кривизн (рис. 3). Последнее позволяет ориентировать пуансон, а, следовательно, анизотропную заготовку относительно зажимов пресса. Тогда будет иметь место совпадение главных направлений деформации с направлениями главных кривизн оболочки. Совпадение обеспечивается на любой промежуточной стадии формообразования, что создает условия для равномерного изменения толщины заготовки [6].

Для этого найдены изопараметрические линии сетки главных кривизн с гауссовыми координатами  $u$  и  $n$ . В результате значительная разнотолщинность оболочки, получаемая обтяжкой, не наблюдается. Используя механизм изменения соотношения между деформациями при обтяжке анизотропной заготовки в пользу той, которая уменьшает ее утонение, можно получить оболочку с минимальной разнотолщинностью.

Если деформацию по толщине заготовки  $e_3$  задать технологическими условиями

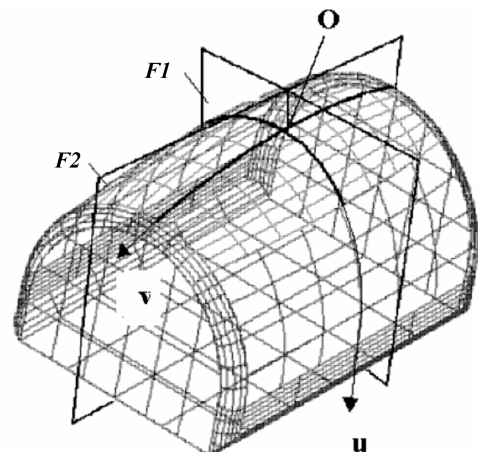


Рис. 3. Обтяжной пуансон двояковыпуклой формы

процесса обтяжки, то она принимается за допустимое утонение. Изменение толщины листовой заготовки ограничивается прочностью обшивочной детали:

$$e_3 = \ln \left| \frac{h_n - \Delta h - \delta(-)}{h_n} \right|, \quad (7)$$

где  $h_n$  – номинальная толщина листовой заготовки;

$\Delta h$  – допустимое изменение толщины;

$\delta(-)$  – минусовый допуск на толщину.

При обтяжке заготовку деформируем в направлении проката листа, т.е. в направлении одного из показателей анизотропии  $m_{21}$ . Следовательно, допустимая деформация  $e_{дон}$  примет вид:

$$e_{дон} = e_3 \frac{1 - \mu_{21} \cdot m}{1 + \mu_{21} \cdot m \left( \frac{1}{\mu_{12}} - 1 \right) - \mu_{21}}, \quad (8)$$

где  $m = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$  – соотношение напряжений.

Если выполнить правильный подбор толщины листовой заготовки и сформировать в нем рациональные показатели анизотропии, то можно значительно увеличить  $e_{дон}$ .

### Деформация минимального растяжения

Минимальную деформацию растяжения  $e_{мин}$  необходимо задавать исходя не только из условия выведения толщины листового материала за предел текучести, после изгиба заготовки по пуансону, но и из условия получения оболочки с необходимыми геометрическими параметрами. После снятия внешних сил, полной разгрузки оболочки не происходит из-за жесткости формы, связанной со второй кривизной. Фактически разгрузка соответствует неравномерной упругой деформации волокон заготовки в продольном направлении  $2l$  и  $2l_K$  противоположной растяжению (рис. 2). Кроме того, считаем, что оболочка двойной кривизны при разгрузке испытывает осесимметричный изгиб относительно центрального поперечного сечения АОА.

При этих условиях, что толщина оболоч-

ки перед ее пружинением получена постоянная, значение  $e_{мин}$ , характеризующее минимальную упругую отдачу заготовки после разгрузки примет вид:

$$e_{мин} = \left[ \frac{4K_1}{E_1} \left( \frac{\mu_{12}}{\mu_{21}} + \frac{r_K}{R_2 \cos \beta_K} \right) \right]^{\frac{1}{1-n}}, \quad (9)$$

где  $E_1, K_1$  – соответственно модуль упругости и пластичности деформируемого материала в направлении растяжения листа;

$n$  – константа упрочнения материала заготовки;

Отметим, что в формулу (9) входят геометрические параметры центрального поперечного сечения оболочки ( $r_K, R_2, \beta_K$ ) и механические свойства материала заготовки ( $K_1, E_1, n, \mu_{12}, \mu_{21}$ ).

### Деформация предельно допустимого формоизменения

В листовой штамповке экстремальные условия часто связывают с локализацией деформации, которое предшествует разрушению заготовки. При этом схема напряженного состояния содержит в плоскости листа одно из напряжений растяжения. Усилие от напряжения растяжения в момент начала локализации деформации достигает максимального значения.

Дальнейшее падение усилия объясняется тем, что площадь сечения заготовки за счет утонения уменьшается более интенсивно, чем рост напряжений за счет упрочнения. Тогда оценку предельного формоизменения обычно проводят с использованием критериев. Предельные возможности процесса обтяжки определяют из соотношения:

$$\frac{de_{1\alpha}}{d\alpha} = \frac{\mu}{\left( \frac{n}{e_{12}} \right)^{-1}}, \quad (10)$$

где  $e_{1\alpha}$  – деформация растяжения в некотором фиксированном поперечном сечении под углом  $\alpha$ .

Как видно из соотношения (10), скорость изменения деформации вдоль угловой координаты  $\alpha$  неограниченно возрастает, т.е.

$\frac{de_{1\alpha}}{d\alpha} = 0$ , когда деформация  $e_{1\alpha}$  приближается к значению  $n$ . Это свидетельствует о резком изменении толщины заготовки в рассматриваемом сечении. Тогда имеем:

$$(1 - e_{10})e_{10}^n = (1 - n)(1 - \mu\alpha)n^n. \quad (11)$$

Видно, что с ростом упрочнения металла, снижается влияние трения, а также с уменьшением угла охвата, деформация  $e_{10}$  увеличивается, и становится наибольшей.

Далее зная  $e_{10}$  определяем деформацию по толщине заготовки:

$$e_s = e_{10} \frac{1 + \mu_{21} \cdot m \left( \frac{1}{\mu_{12}} - 1 \right) - \mu_{21}}{1 - \mu_{21} \cdot m}. \quad (12)$$

Второй путь состоит в том, что на вершине можно задать определенную деформацию и рассчитать допустимый угол охвата и параметр трения из произведения:

$$\mu\alpha = 1 - \frac{(1 - e_{10})e_{10}^n}{(1 - n)n^n}. \quad (13)$$

Проведенная оценка предельного формоизменения позволяет выбрать схему обтяжки, реализуемую без локализации деформации на свободной части заготовки при сохранении зоны наибольших деформаций в районе точки  $O$  на протяжении всего процесса.

### Назначение оптимальной деформации растяжения

Значение оптимальной деформации  $e_{opt}$  ограничено  $e_{min}$ ,  $e_{np}$ ,  $e_{кр}$  и  $e_{дон}$ :

$$e_{кр} \ll e_{min} \ll e_{opt} \ll e_{дон} \ll e_{np}. \quad (14)$$

Из неравенств (14) могут выпасть  $e_{min}$  и  $e_{дон}$ , тогда запишем:

$$e_{кр} \ll e_{opt} \ll e_{np}.$$

Тогда при проектировочном расчете и отладке выбранной схемы обтяжки остается правильно установить оптимальную степень растяжения за переход отоженной листовой заготовки и выполнить повторную обтяжку заготовки в свежезакаленном состоянии по

одному и тому же пуансону.

Из изложенного следует, что процесс обтяжки оболочек сложных форм успешно реализуется при вполне определенных значениях показателей анизотропии  $\mu_{12}$ ,  $\mu_{21}$  и за счет совпадения направления обтяжки с направлениями главных кривизн оболочки.

Предложенные условия равномерного изменения толщины заготовки были реализованы на практике при получении оболочки с минимальной разнотолщинностью, что явилось серьезным резервом интенсификации процесса обтяжки. В результате назначения оптимальной деформации при обтяжке характеризуются только  $e_{np}$  материала заготовки с учетом получения в листах рациональной анизотропии свойств.

Знание технологической деформируемости анизотропного листового материала с учетом режимов его проката, отжига, закалки и старения весьма важен. В противном случае неизбежен брак или увеличение числа переходов по сравнению с расчетными значениями в несколько раз.

Комплексный подход для назначения оптимальной деформации создает условия деформирования, которые обеспечат эксплуатационные характеристики готовой детали с учетом технологической наследственности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рекомендации по технологичности самолетных конструкций. Под общим руководством и редакцией проф. В.В. Бойцова. Часть 4. Технологичность конструкции деталей из листового материала, профилей и труб / Редактор проф. А.Н. Громова. М.: Оборонгиз, 1959.
2. Понагайдо Ю.Н. Крупнокристаллическая структура в плакирующем слое алюминиевых обшивочных листов // Сб. статей. Деформируемые алюминиевые сплавы. – М.: Оборонгиз, 1961.
3. Арышенский Ю.М., Гречников Ф.В., Арышенский В.Ю. Получение рациональной анизотропии в листах / Под. ред. Гречникова Ф.В. М.: Металлургия, 1987.
4. Гречников Ф.В. Деформирование анизот-



- ропных материалов. М.: Машиностроение, 1998.
5. *Арышенский Ю.М., Гречников Ф.В.* Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов. М.: Металлургия, 1990.
6. *Михеев В.А.* Направленное изменение толщины заготовки при формообразовании обтяжкой обводообразующих оболочек двойной кривизны // Труды международной научно-технической конференции “Проблемы и перспективы развития двигателестроения”. Самара: СГАУ, 2003.

## DEFORMATION OF SHEET BILLET AT FORMING COMPLEX FORMS COVERS IN VIEW OF THE TECHNOLOGICAL HEREDITY

© 2004 V.A. Mikheev

Samara State Aerospace University

Article is dedicated to the questions of obtaining the qualitative shells of intricate shapes in connection with a change of the material billet properties in the process of their manufacture. In it the level of optimum dilatational strain for the passage is determined, which makes it possible to create the appropriate operating characteristics taking into account technological heredity. It follows from that presented, that the process of the stretch-wrap forming of the shells of intricate shapes successfully realizes with the well-defined values of the indices of anisotropy, obtained by billet during rolled stock and heat treatment, and also due to the agreement of the stretch-wrap forming direction with the direction of the shell surface principal curvatures.