

УДК 621.9.044+629.7

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА УСИЛИЙ РАСТЯЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ БЕЗ ОБРАЗОВАНИЯ ГОФРОВ ПРИ ОБТЯЖКЕ

© 2012 С. Г. Дементьев

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

В конструкциях летательных аппаратов имеются обводообразующие детали, при изготовлении которых с помощью обтяжных технологических процессов возможно образование гофров, которые в полной мере не удаётся выправить всеми известными способами доводки. Разработана методика расчёта усилий растяжения листовых заготовок, позволяющая уменьшить вероятность гофрообразования при обтяжке и снизить трудоёмкость работ.

Летательные аппараты, обводообразующие детали, технологические процессы, обтяжка, образование гофров, методика расчёта.

Возрастающие требования к качеству изготовления металлических обводообразующих деталей, стремление к повышению производительности оборудования и исключению ручных доводочных работ подчёркивают актуальность исследований, направленных на создание и внедрение в технологическую практику нового оборудования и совершенствование процессов пластического формообразования.

Недостаточная изученность названных технологических процессов обуславливает наличие значительного объёма ручных доводочных работ при обтяжке пологих обшивок и необходимости интуитивного управления оборудованием при свободной гибке панелей.

Так, при формообразовании пологих листовых обшивок на существующих обтяжных прессах неизбежно возникают продольные гофры, которые в полной мере не удаётся выправить всеми известными способами доводки. Это приводит к низкому качеству деталей, к возможностям появления брака, а также к завышению технологической себестоимости из-за большого объёма доводочных работ.

Что касается процесса свободной гибки панелей, то добиться высокого и стабильного уровня качества формообразуемых деталей можно будет только при

создании надёжных математических моделей и научно обоснованных методов расчёта технологических параметров, позволяющих наиболее рационально управлять кинематикой исполнительных органов оборудования, оснащённого системой числового программного управления.

Решить все задачи, связанные с достижением поставленных целей, основываясь только на экспериментальных исследованиях или только на базе математического моделирования, не удаётся. Поэтому в качестве основного метода исследования в работе принят экспериментально-теоретический метод. Отсутствие экспериментальных данных о характере поля прогибов панели, загруженной не по центру, исключает возможность использования методики в существующем виде для составления управляющих программ, позволяющих выполнять формообразование реальных панелей на оборудовании с ЧПУ.

При формообразовании панелей дробью так же как и при гибке-впередвижку проявляется взаимное влияние смежных сечений. Оригинальная методика оценки взаимного влияния участков формообразуемой дробью панели была предложена Д. А. Журавлевым [1]. Суть методики заключается в том, что на базе экспериментально установленных

коэффициентов взаимного влияния решается задача о назначении режимов обработки панели дробью, обеспечивающих получение деталей требуемой формы. Главным недостатком этой методики является необходимость проведения большого количества экспериментов для нахождения эмпирических коэффициентов взаимного влияния смежных участков для панелей, различающихся по геометрии, соотношению жесткостей и характеристикам материала. Причем полученные эмпирические коэффициенты не пригодны для процесса гибки-впередвижку, поскольку зоны нагружения панели свободным изгибом (при гибке-впередвижку) и распределенным моментом (при формообразовании дробью) существенно отличаются одна от другой.

Продольная кривизна детали при комбинированном формообразовании получается на валковом или прессовом оборудовании, а на стрингерных панелях путем раскатывания ребер. Поперечная кривизна образуется за счет односторонней обработки дробью. Варьирование величинами продольной и поперечной кривизны дает возможность изготовить детали бочкообразной, цилиндрической и седловидной форм.

Разделение процесса формообразования панели на отдельные операции обеспечивает возможность их контроля и управления, но и этого оказывается недостаточно для получения готовой детали в полностью автоматическом режиме. Разброс механических свойств может привести к набору излишней кривизны, о чем станет известно лишь после того как панель выйдет из камеры дробеударного формообразования когда завершится ее обработка площади. Это потребует трудоемкой ручной работы по «разгибанию». Поэтому в технологии комбинированного формообразования панелей предусмотрено две операции: предварительное формообразование детали с получением 70...90% требуемой кривизны в программном режиме и окончательная доводка формы в ручном режиме управления гибочным

оборудованием. От полной автоматизации процесса, требующей оцифровки промежуточной формы панели и генерации управляющей программы доводочной обработки, создатели комбинированного метода формообразования отказались по причине сложности этих процедур.

Помимо некоторого объема ручной доводки, присутствующего в технологии комбинированного формообразования панелей, к недостаткам следует отнести и тот факт, что для осуществления формообразования требуется несколько видов оборудования - прессовое (для формообразования локальных усилений), валковая машина или раскатной станок (для набора продольной кривизны), дробеметная установка с программным управлением (для набора поперечной кривизны) и зачистные головки (для абразивной шлифовки лепестковыми кругами обработанных дробью поверхностей).

Установлено, что угол охвата обволакивающей детали полностью определяет характер взаимного влияния ее смежных участков. Это относится как к листовым обшивкам, так и к монолитным панелям. У листовых обшивок с малыми углами охвата в зоне купола детали при обтяжке происходит сдвиг боковин к вершине купола с образованием продольных гофров, а у монолитных панелей с малыми углами охвата минимизируются габариты смежных зон, оказывающих влияние на напряженно-деформированное состояние формообразуемого участка панели. Общность листовых деталей и монолитных панелей с малым углом охвата деталей позволяет сделать вывод о том, что существующие методики расчета не позволяют объяснить и математически описать специфику формообразования пологих обшивок, заключающуюся в возникновении продольных гофров на вершине купола детали, и не дают научно обоснованных указаний на введение каких-либо изменений в процесс обтяжки этих деталей, обеспечивающих исключение гофрообразования.

Анализ теоретических работ в области обтяжки листовых обшивок двойной кривизны показывает, что впервые практический опыт периода освоения процесса обтяжки был обобщён и математически исследован А.Н. Громовой [2]. В названной работе было предложено оценку предельных возможностей процесса простой обтяжки осуществлять с помощью коэффициента обтяжки $K_{обт}$, а для сравнения геометрических форм различных деталей использовать геометрический коэффициент обтяжки:

$$K_{обт} = 1 + \varepsilon_{наиб},$$

$$K_r = 1 + \varepsilon_{ln}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{наиб}$ – наибольшая деформация растяжения, возникающая в центральном волокне детали с учётом сил трения (рис.1), ε_{ln} – наибольшая деформация растяжения

в центральном волокне детали при отсутствии сил трения.

Разработанный в предыдущем десятилетии специалистами отечественных предприятий и институтов комбинированный метод формообразования панелей, включающий в себя гибку локальных монолитных усилений на гидропрессе, набор продольной кривизны на гибочно-валковых или давилочно-раскатных машинах, набор поперечной кривизны дробеударным методом и зачистку поверхности лепестковыми абразивными кругами, технически сложен и не ориентирован на полную автоматизацию процесса формообразования, поскольку изначально предполагает наличие доводочных работ с ручным управлением для компенсации разброса механических свойств заготовки.

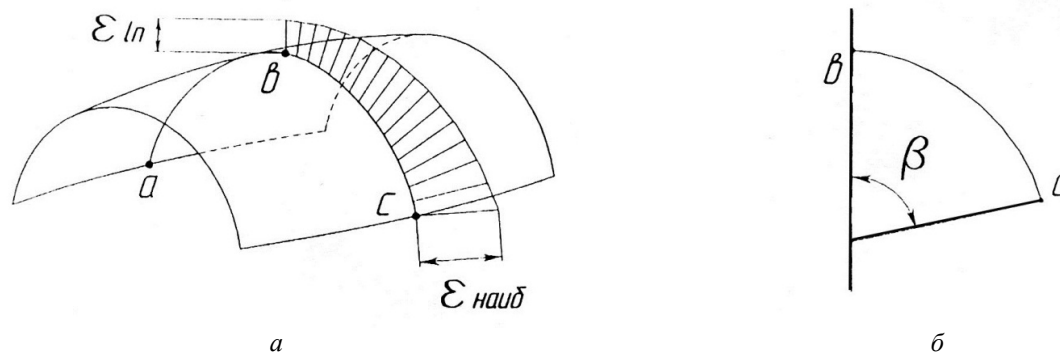


Рис. 1. Листовая деталь двойной кривизны:
 а - распределение деформации растяжения по центральному волокну;
 б - наибольший угол охвата по центральному волокну

Применительно к панелям пологой формы не выявлено никаких ограничений, препятствующих сочетанию стратегии комбинированного метода формообразования с идеологией составления управляющей программы для гидропресса с ЧПУ, которая бы учитывала взаимное влияние смежных участков и корректировалась в процессе изготовления панели для компенсации разброса механических свойств, что позволит сократить затраты на оборудование и исключить субъективный фактор из управления процессом формообразования.

В результате анализа обводообразующих деталей и технологического обо-

рудования, применяемого для их формообразования, была выявлена малоизученная группа деталей из листов и панелей, выделенная из общей номенклатуры по признаку пологости формы. Установлено, что пластическое формообразование пологих обводообразующих деталей сопряжено с рядом присущих только им специфических особенностей, касающихся схем нагружения при формообразовании, методов расчета технологических параметров, поведения заготовки при нагружении и пружинении.

Для преодоления выявленных сложностей при практической реализации процессов пластического формообразования

пологих обводообразующих деталей необходимо решить ряд научно-технических задач. Их можно сформулировать следующим образом:

1. Экспериментально проверить адекватность предлагаемой для дальнейшего использования гипотезы от асимптотическом приближении остаточной формы пологой длинномерной панели к совокупности остаточных форм несвязанных отсеков, на которые можно условно разбить эту панель, при кинематическом управлении процессом нагружения.

2. Разработать достаточно строгую и удобную для практического использования математическую модель процесса свободной гибки.

3. Выявить путем численного моделирования процесса свободной гибки влияние на остаточную форму детали разброса механических свойств и геометрии исходной заготовки.

4. Разработать алгоритмы корректировки параметров управления гидропресом в зависимости от действительных свойств формообразуемых деталей и создать методику составления управляющих программ для процесса свободной гибки и правки длинномерных пологих панелей на оборудовании с ЧПУ.

5. Найти принципу возникновения продольных гофров при обтяжке листовых обшивок с пологим куполом и разработать математическую модель, описывающую процессы зарождения и развития продольных гофров. Оценить влияние геометрии детали и технологических параметров процесса обтяжки на гофрообразование и пластические свойства формообразуемой листовой заготовки.

6. Разработать и внедрить в производство специальное технологическое оснащение, позволяющее выполнять обтяжку листовых деталей с пологим куполом без возникновения продольных гофров.

Требуемая величина усилия поперечного растяжения Q задаётся при выполнении процесса обтяжки, а силу трения F вычислим по известным силе растяжения N и углу охвата α^* :

$$F = N \sin \alpha^* f, \quad (2)$$

где $N = \sigma_x B h$ – усилие растяжения купола заготовки при обтяжке.

При правке гофра растягивающей силой Q сила трения изменит направление.

Усилие поперечного растяжения, исключая возможность возникновения гофрообразования при обтяжке, можно найти из выражения

$$Q > 2T - F - \sigma_y^{сп} \cdot Lh. \quad (3)$$

Формула (3) применима в том случае, когда весь процесс обтяжки удаётся осуществить без потери устойчивости листовой заготовки. Но в ряде случаев этого сделать нельзя. И тогда сила трения F становится вредной, препятствуя силе Q смещать зоны K_1 и K_3 для разглаживания возникшего гофра. Математически вредное влияние силы трения можно отразить сменой знака в формуле (3)

$$Q > 2T + F - \sigma_y^{сп} \cdot Lh. \quad (4)$$

Подставляем в (4) выражение (2)

$$Q > t_{\max} r \left(\frac{p}{2} - a^* \right) h + s_x B h \sin a^* f - \frac{2}{3} \left[\frac{K}{(s_x^2 - s_x \cdot s_y + s_y^2)^{\frac{1-n}{2}}} \right] \cdot \frac{h}{r} Lh \quad (5)$$

с целью оценки значимости слагаемых в формуле (5).

Для выполнения приближённых расчётов сделаем ряд допущений в формуле (6):

$$t_{\max} \approx \frac{2}{3} s_x;$$

$$\sin a^* \approx a^*;$$

$$s_y \approx 0 \rightarrow \left[\frac{K}{(s_x^2 - s_x \cdot s_y + s_y^2)^{\frac{1-n}{2}}} \right]^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{s_x}{e_x}. \quad (6)$$

С учётом этих допущений формула (5) примет следующий вид

$$Q > \frac{2}{3} s_x r \left(\frac{p}{2} - a^* \right) h + s_x B h a^* - \frac{2 s_x}{3 e_x} \cdot \frac{h}{r} L h = \frac{2}{3} s_x r \left[r \left(\frac{p}{2} - a^* \right) + \frac{3}{2} B a^* - \frac{L h}{r e_x} \right] = \frac{2}{3} K e_x^n h \left[r \left(\frac{p}{2} - a^* \right) + \frac{3}{2} B a^* - \frac{L h}{r e_x} \right]. \quad (7)$$

Первое, второе и третье слагаемые в квадратных скобках формулы (7) прямо пропорциональны соответствующим слагаемым в формуле (4). Оценим их значимость на конкретном примере. Пусть $r = 100$ мм, $\alpha^* = 0,2$ рад, $B = 1000$ мм, $p = 500$ мм, $\epsilon_x = 0,01$. Тогда

$$\begin{aligned} r \left(\frac{\pi}{2} - \alpha^* \right) &= 100 \left(\frac{3,14}{2} - 0,2 \right) = 137, \\ \frac{3}{2} B \alpha^* &= \frac{3}{2} 1000 \cdot 0,2 = 300, \\ \frac{L h}{r e_x} &= \frac{2 \cdot 500 \cdot 0,2 \cdot 0,5}{500 \cdot 0,1} = 2. \end{aligned} \quad (8)$$

В процентном выражении доля первого слагаемого $137 / (137 + 300 + 2) \cdot 100\% \approx 31\%$, доля второго слагаемого $300 / (137 + 300 + 2) \cdot 100\% \approx 68\%$, а доля третьего слагаемого менее 1%.

Принимая для рассматриваемого примера материал заготовки Д16М ($K=48$, $n=0,265$) и толщину $h=0,5$ мм, построим графики зависимости усилия поперечного растяжения Q от деформации обтяжки купольной зоны ϵ_x (рис.2).

Анализ графиков на рис.2 показывает, что достаточное для исключения гофрообразования усилие поперечного растяжения (линия «а» на рис.2) в несколько раз меньше аналогичного усилия, гарантирующего возможность правки появившихся гофров под нагрузкой (линия «б» на рис. 2).

При создании технологического оснащения для поперечного растяжения листовой заготовки в процесс обтяжки, нецелесообразно заранее закладывать гарантированную возможность правки гофров под нагрузкой, т.к. это приведёт к не-

оправданному утяжелению конструкции и уменьшению её приспособляемости к различным видам конфигурации обтягиваемых деталей.

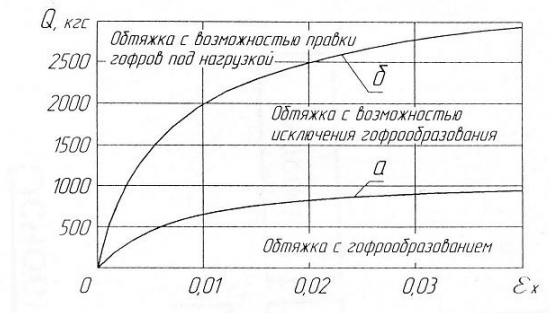


Рис. 2. Зависимости $Q(\epsilon_x)$, разграничивающие характерные области обтяжки при наличии поперечного растяжения: а – зависимость $Q(\epsilon_x)$ без влияния силы трения в купольной зоне; б – зависимость $Q(\epsilon_x)$ с влиянием трения на выправляемый гофр

Исходя из этого для расчёта требуемых усилий поперечного растяжения, исключающих гофрообразование при обтяжке, можно рекомендовать следующую формулу

$$Q > 2T - \sigma_y^p \cdot Lh. \quad (9)$$

Исключить блокирующее влияние силы трения на разглаживание продольных гофров силой поперечного растяжения можно за счёт пилообразной диаграммы вертикального хода обтяжного пуансона (рис.3).

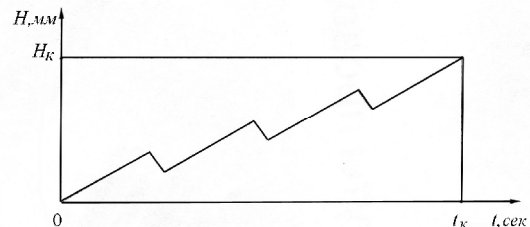


Рис. 3. Пилообразная диаграмма вертикального хода обтяжного пуансона, гарантирующая возможность разглаживания гофров поперечным растяжением

Чередование интервалов времени t с нарастанием вертикального хода обтяжного пуансона и его «просадками» позволит в момент «просадок» снизить напряжения растяжения σ_x до близких к нулю значений и исключить за счёт этого силу трения между купольной частью листовой заготовки и обтяжным пуансоном, а следовательно, и обеспечить разглаживание возникших гофров поперечной растягивающей силой.

Библиографический список

1. Журавлёв, Д. А. Исследование процесса ППД для формирования деталей [Текст] / Д. А. Журавлёв // Труды науч.-техн. конф. «Интенсификация производства и повышение качества изделий ППД», Тольятти, - 1989. - С. 85.
2. Громова, А. Н. Исследование процесса формообразования обтяжкой листовых оболочек [Текст] / А. Н. Громова // Труды НИАТ. - 1962. - №145. - 202 с.

PROCEDURE OF CALCULATING EFFORTS OF BLANK STRETCHING WITHOUT CORRUGATION IN STRETCH FORMING

© 2012 S. G. Dementyev

Samara State Aerospace University

The paper presents a procedure of calculating efforts of sheet blank forming which makes it possible to reduce the probability of corrugation in stretch forming and the labor input.

Aircraft, line-forming parts, technological processes, stretch forming, corrugation, calculation methods.

Информация об авторе

Дементьев Сергей Геннадьевич, аспирант кафедры производства летательных аппаратов СГАУ, генеральный директор ЗАО «Авиастар-СП». E-mail: dementyev_sg@aviastar-sp.ru. Область научных интересов: технологические процессы, формообразование обводообразующих деталей, устранение гофров, повышение качества изготовления.

Dementyev Sergey Gennadyevich, post-graduate student, the department of air and space craft manufacture and quality management in engineering; director general, "AVIASTAR-SP" Ltd. E-mail: dementyev_sg@aviastar-sp.ru. Area of research: technological processes, aircraft production.