

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОБРАЗОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Для получения деталей заданной формы используют следующие технологические процессы:

- литье, которое заключается в заполнении формы расплавленным материалом с дальнейшим переходом жидкого материала в твердое состояние и получением заготовки, близкой по конфигурации и размерам к изделию;
- конденсация, основанная на осаждении на подложку материала, находящегося в парообразном состоянии, в результате чего происходит переход вещества из газообразного в жидкое или твердое состояние;
- резание, заключающееся в удалении с заготовки в определенных местах части материала (припуска);
- обработка давлением, которая заключается в получении заготовок или деталей в результате силового воздействия инструмента на обрабатываемый материал и его деформирования до состояния текучести;
- 3-D печать, сочетающая отдельные черты конденсации и литья и приобретающая все большие масштабы применения в последнее время.

Большинство деталей фюзеляжа, крыла и оперения самолета изготавливают из листовых заготовок, используя различные технологические процессы, которые основаны на пластическом деформировании с образованием остаточных деформаций при формоизменении. При штамповке, обтяжке и других способах материал заготовки переводится в пластическое состояние совместным действием растяжения и изгиба. Чем больше доля сечения заготовки, находящаяся в состоянии текучести, т.е. когда суммарные напряжения растяжения и изгиба равны пределу текучести материала, тем более устойчивы остаточные деформации и более эффективно формоизменение.

На рис. 1 показано распределение напряжений по толщине листа при формоизменении растяжением с изгибом, например при штамповке. Максимальные остаточные деформации и минимальные пружинения имеют место, когда суммарные напряжения равны пределу текучести по большей части толщины. Чем ниже предел текучести материала, тем меньше деформация пружинения, т.е. возврата при деформировании (рис. 1, б).

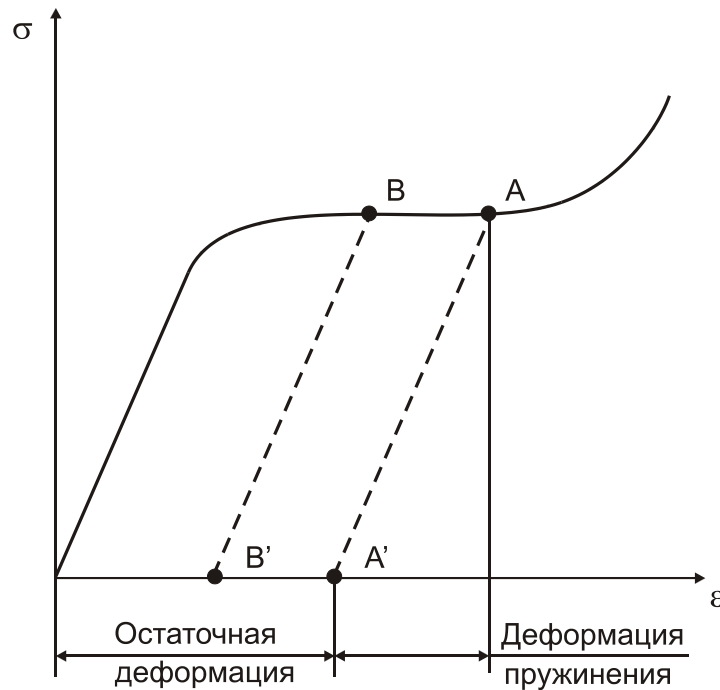
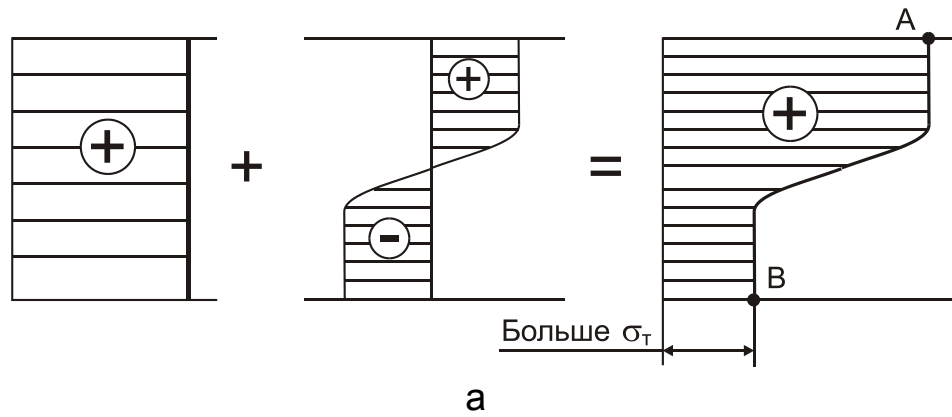


Рисунок 1 – Распределение напряжений и деформаций по толщине листовых заготовок при формоизменении

В работе [1] указывалось, что из-за стеснения свободных пуассоновых деформаций при штамповке возникает сжимающее напряженное состояние. Возможная потеря устойчивости листа приводит к образованию дефектов в виде выпуклостей (рис. 2, а). При импульсном нагружении инерционные силы регулярной части детали играют роль стеснителя деформации и представляет интерес задача о параметрах выпуклости, которую можно устранить обычным прижатием (рис. 2, б).

При быстром деформировании листа, прижатом из положения 1 в положение 2 (см. рис. 2, б), можно принять, что радиальные деформации стеснены и равны

$$\varepsilon = \frac{2r - S}{S} = \frac{2r}{S} - 1, \quad (1)$$

где S – длина дуги выпуклости.

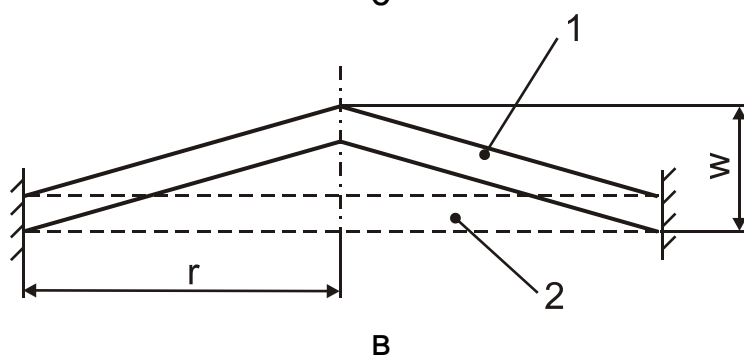
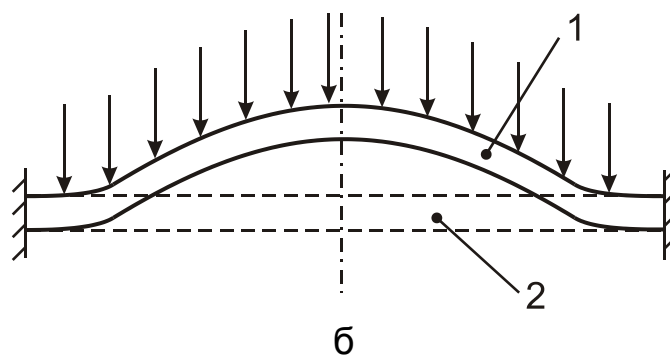
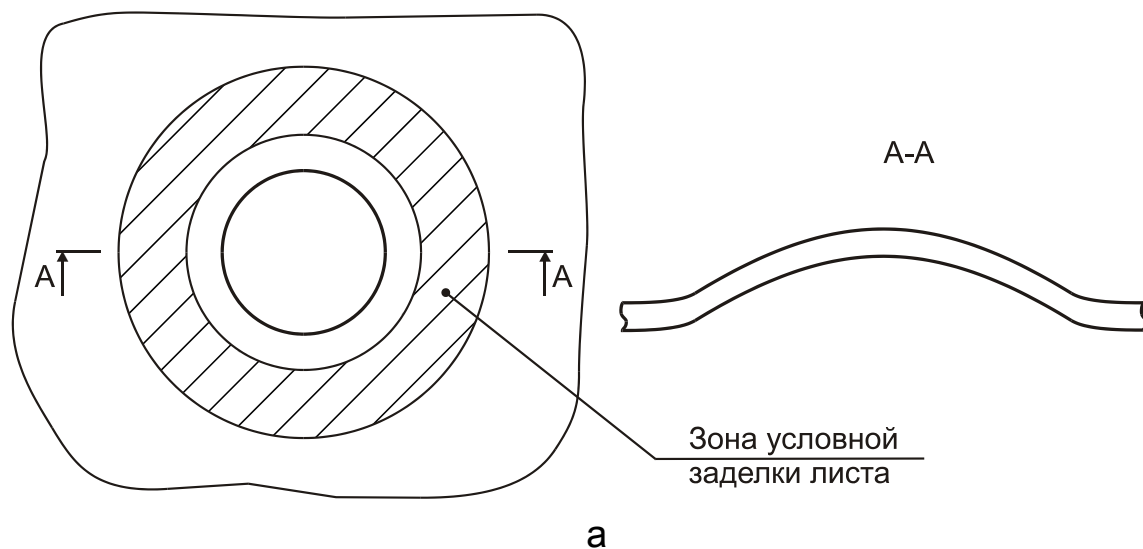


Рисунок 2 – К задаче о параметрах дефектов формы

Очевидно, что для оценки искомых параметров криволинейную дугу можно заменить прямой (рис. 2, в), длина которой гарантированно меньше длины дуги. В этом случае деформация будет определяться формулой

$$\varepsilon_r = \frac{r - \sqrt{r^2 + w^2}}{\sqrt{r^2 + w^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{w^2}{r^2}}} - 1, \quad (2)$$

где w – стрела прогиба дефекта (см. рис. 2, в).

Импульсным прижатием этот дефект будет устранен тогда, когда в результате деформирования напряжения сжатия станут больше предела текучести, т.е.

$$\varepsilon_r \geq \frac{\sigma_T}{E}, \quad (3)$$

где σ_T – предел текучести материала.

В полярной системе координат уравнение физического закона имеет вид [2]

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_\theta); \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \mu\sigma_r). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь σ_r и σ_θ – соответственно радиальные и тангенциальные напряжения.

Так как из чисто геометрических соображений радиальная и тангенциальная деформации равны между собой, то из системы (4) следует, что

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma. \quad (5)$$

Тогда

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma}{E}(1 - \mu). \quad (6)$$

С помощью условия (3) получим

$$\sigma(1 - \mu) \geq \sigma_0$$

или с использованием выражения (2)

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{w^2}{r^2}}} - 1 \leq \frac{-\sigma_T}{E}. \quad (7)$$

Знак «минус» в правой части отражает сжимающие напряжения. Решением этого неравенства является условие

$$\frac{w}{r} \geq \sqrt{\frac{1}{\left[1 - \frac{\sigma_T}{E}(1 - \mu)\right]^2}}. \quad (8)$$

В таблице приведены значения w/r для ряда конструкционных материалов.

Таким образом, при значениях относительной стрелы прогиба дефекта формы больше, чем определяемые условием (8), импульсное прижатие обеспечит требуемое пластическое деформирование и соответственно устранение дефекта. На этом принципе основана рихтовка деталей кузова автомобиля на станциях технического обслуживания.

Таблица – Потребные значения относительной стрелы прогиба дефекта формы

Материал	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести, МПа	w/r
Сталь 4340	207	0,30	862	0,0777
Нержавеющая сталь 440А	200	0,30	415	0,0549
Алюминиевый сплав 2024	72,4	0,33	325	0,0783
Титановый сплав Ti-6Al-4V	114	0,34	830	0,0985

Кроме растяжения-сжатия формоизменение возможно за счет пластического сдвигового деформирования (рис. 3). Такой механизм целесообразен из-за того, что в принципе любое пластическое деформирование реализуется в результате сдвига отдельных частей кристаллов относительно друг друга по плоскостям скольжения с наибольшей плотностью упаковки атомов [3].

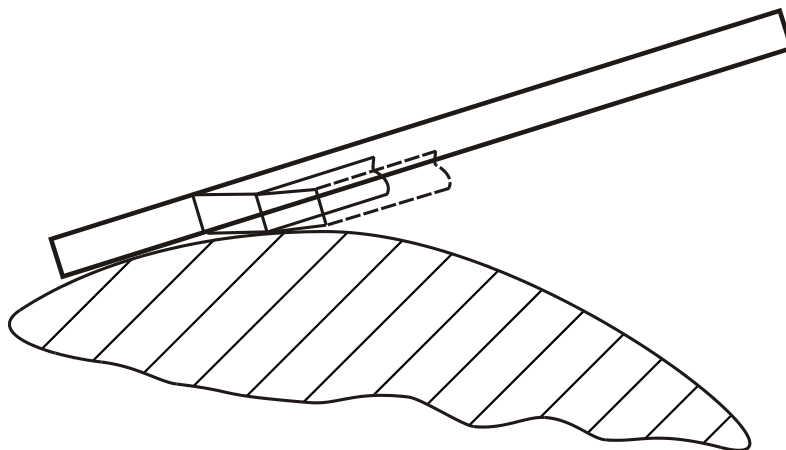


Рисунок 3 – Схема сдвигового пластического деформирования

Для практического осуществления этого способа формоизменения необходимо обеспечить последовательный сдвиг материала заготовки,

что можно достичь соответствующим нагружением, например ударной волной. При больших скоростях деформирования проявляется неустойчивое течение материала [4], приводящее к образованию локализованных полос сдвига, что облегчает формоизменение заготовки. Таким образом, непосредственное сдвиговое пластическое деформирование, а не через сжатие или растяжение, представляет практический интерес вследствие того, что исключаются процессы непродуктивного расхода внешней энергии.

В реальном производстве трудно обеспечить «чистоту» того или иного вида пластического деформирования – имеет место совместное действие всех механизмов, но необходимо помнить о том, что в основе лежит сдвиг кристаллической решетки, реализовываемый различными напряжениями.

Выводы

Таким образом, рассмотрены особенности образования остаточных деформаций при различных способах формоизменения – растяжения с изгибом, растяжения-сжатия, сдвигового пластического деформирования. Получены выражения, выполнение которых обеспечит требуемое пластическое деформирование и соответственно устранение дефектов формы детали.

Список использованных источников

1. Остапчук, В.В. Классификация вероятных дефектов формы листовых деталей летательных аппаратов [Текст] / В.В. Остапчук // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(83). – Х.: НАКУ, 2015. – С.41-44.
2. Писаренко, Г.С. Соппротивление материалов [Текст] / под ред. акад. АН УССР Г.С. Писаренко. – К.: Вища школа, 1986. – 736 с.
3. Лейкин, А.Е. Авиационное материаловедение [Текст] / А.Е. Лейкин, Э.С. Пороцкий, Б.И. Родин. – М.: Машиностроение, 1964. – 459 с.
4. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов [Текст] / под ред. М.А. Мейерса, Л.Е. Мура. – М.: Металлургия, 1984. – 512 с.

Поступила в редакцию 15.01.2016.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. Я.С. Карпов,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*