

6. Сосенушкин, Е.Н. Технологические процессы штамповки изделий из толстостенных труб / Е.Н. Сосенушкин, В.В. Третьюхин, Е.А. Яновская // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2013. – № 2. – С. 25–29.

7. Ковка и штамповка: справочник: в 4 т. / ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – Т. 2: Горячая объемная штамповка / под ред. Е.И. Семенова. – 1986. – 592 с.

8. Розов, Н.В. Холодная прокатка стальных труб / Н.В. Розов. – М.: Металлургия, 1977. – 184 с.

УДК 621.98.04

В.В. КЛУБОВИЧ, д-р техн. наук (НАН РБ)
В.А. ТОМИЛО, д-р техн. наук (БНТУ)
М.Л. НЕСТЕРОВИЧ (МЗКТ, БНТУ)

ТЕХНОЛОГИЯ ГИБКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Введение. При изготовлении усиленных элементов кузовов автомобилей применяют высокопрочные конструкционные стали Millux Protection толщиной $S = 4\text{--}6$ мм. Особенность данных сталей состоит в том, что они имеют высокую твердость 320–560 НВ, предел текучести $\sigma_T = 800\text{--}1250$ МПа и предел прочности $\sigma_B = 1000\text{--}1600$ МПа. Однако в большинстве случаев увеличение прочности стали сопровождается снижением ее пластических свойств. В этой связи высокопрочные стали плохо поддаются операциям холодной штамповки, в частности гибке. При гибке указанных сталей радиусом, равным толщине материала $r = S$, имеют место такие негативные явления, как упругое пружинение, образование трещин вдоль линиигиба, повышенное усилие гибки. И если явления упругого пружинения и повышенного усилия гибки не являются критичными, то образование трещин вдоль линиигибки является неисправимым дефектом.

Согласно сведениям производителя данные стали, во избежание образования трещин вдоль линиигибки, возможно изгибать при соблюдении отношения радиуса кривизны пуансона r к толщине материала S , а также отношения расстояния между кромками мат-

рицы W к толщине материала. К примеру, для стали Miilux Protection 500 отношение $\frac{r}{S} = (6...8)$; $\frac{W}{S} = (15...19)$. Две схемы такого процесса гибки представлены на рисунке 1 [1].

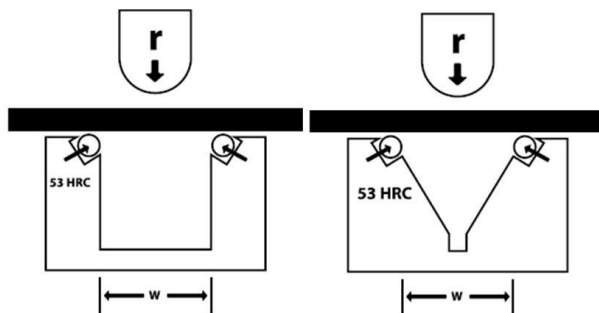
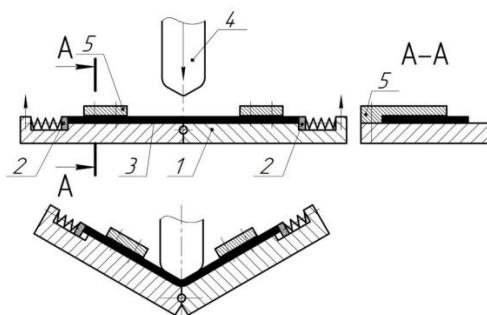


Рисунок 1 – Схемы реализации процесса гибки сталей Miilux Protection

Однако при выполнении данных условий, когда радиус гибки в разы больше толщины материала, значительно теряется общая жесткость изогнутых элементов, что недопустимо для усиленных кузовных деталей автомобилей. В этом случае на производстве приходится прибегать к сварному варианту изготовления деталей из таких сталей, что существенно увеличивает трудоемкость сборки кузовов автомобилей, а также снижает стойкость элементов кузова по сварному шву.

Оптимизация технологии гибки. Предлагается способ гибки, при котором возможно изгибать высокопрочные стали без трещинообразования с минимальным радиусом изгиба. На рисунке 2 изображена схема штампа для гибки деталей из высокопрочных сталей, который содержит поворотную шарнирно-соединенную секционную матрицу 1. К матрице крепятся с обеих сторон подпружиненные упоры 2. Между упорами на матрицу укладывается заготовка 3 и изгибается пуансоном 4. При этом подпружиненные упоры установлены с возможностью регулирования расстояния между ними. При гибке заготовок относительно большой длины на матрицу дополнительно устанавливают ограничители 5, препятствующие потере продольной устойчивости.



1 – поворотная матрица; 2 – подпружиненный упор; 3 – заготовка;
4 – пуансон; 5 – ограничитель

Рисунок 2 – Схема штампа для гибки деталей из высокопрочных листовых материалов

Штамп работает следующим образом. Заготовку 3 из листового материала укладывают на секционную матрицу 1 между подпружиненными упорами 2. При ходе ползуна прессы вниз пуансон 4 изгибает заготовку 3, при этом подпружиненные упоры начинают воздействовать на изгибаемую заготовку вызывая в ней напряжения сжатия. Затем поднимают вверх пуансон 2 и извлекают изогнутую деталь из полости образованной поворотной секционной матрицей.

В результате противодействия подпружиненных упоров на торцы заготовки нейтральный слой в ней становится фиктивным и перемещается наружу на определенное расстояние от изогнутого сечения. В итоге заготовка изгибается с напряжением сжатия в тангенциальном направлении, что и препятствует трещинообразованию, а также способствует уменьшению упругого пружинения.

Рассмотрим более подробно такой процесс гибки (рисунок 3). Как известно, при обычном процессе гибки слои металла внутри угла изгиба сжимаются и укорачиваются в продольном направлении и растягиваются в поперечном направлении. Наружные слои растягиваются и удлиняются в продольном и сжимаются в поперечном направлении [2]. Именно удлинение и растяжение наружных слоев при гибке является причиной трещинообразования высокопрочных листовых материалов.

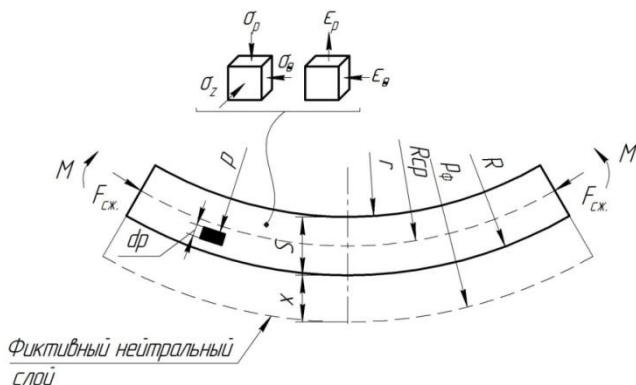


Рисунок 3 – Схемы напряженного и деформированного состояний при изгибе со сжатием

Для предупреждения образования трещин вдоль линиигиба возможно применять силовую интенсификацию, которая заключается в изменении схемы напряженно-деформированного состояния. В таком случае очаг деформации при гибке дополнительно нагружается в тангенциальном направлении сжимающими нагрузками. Такая схема изгиба реализуется в штампе, изображенном на рисунке 2. В нем (штампе) напряжения сжатия, вызванные воздействием подпружиненных упоров на заготовку, накладываются на разноименные напряжения, получающиеся при изгибе, и дают измененную схему распределения напряжений по сечению.

На рисунке 3 показаны схемы напряженного и деформированного состояния, а также смещение нейтрального слоя при изгибе со сжатием (где x – величина смещения). При этом было принято допущение, что изгиб происходит без упрочнения, а ширина изгибаемой заготовки больше ее толщины в несколько раз, в таком случае деформации в направлении ширины затруднены и можно считать что на большей ее части (кроме ширины) возникает плоское деформированное состояние, при котором [3]

$$\sigma_z = \frac{1}{2}(\sigma_p + \sigma_\theta), \quad (1)$$

где σ_z – напряжение, действующее вдоль ширины заготовки; σ_ρ – напряжение, действующее в радиальном направлении; σ_θ – напряжение, действующее в тангенциальном направлении.

Из рисунка 3 видно, что нейтральная поверхность смещается за наружную поверхность заготовки, причем такое возможно лишь тогда, когда сжимающие напряжения, возникающие от силы сжатия пружин $F_{сж}$, достигнут (или будут больше) напряжений текучести. Увеличение сжимающих напряжений может повлиять на конечные размеры изделия, что является недопустимым. Поэтому для упрощения дальнейших расчетов и преобразований примем, что нейтральная поверхность совпала с наружной поверхностью изгибаемой заготовки ($\rho_\phi = R$).

Выделим в очаге деформации элемент размером $d\rho$ и запишем для него уравнение равновесия [3]

$$\frac{\rho d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0. \quad (2)$$

Напряжения σ_ρ и σ_θ отрицательны, поэтому по гипотезе максимальных касательных напряжений уравнение пластичности запишется в виде [3]

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \sigma_T. \quad (3)$$

При совместном решении уравнений (2) и (3) и использовании граничных условий, по которым $\sigma_\rho = 0$ при $\rho = r$, получим формулы, показывающие распределение напряжений по толщине

$$\begin{cases} \frac{\rho d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0; \\ \sigma_\rho - \sigma_\theta = \sigma_T. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sigma_\theta = \frac{\rho d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho; \\ \sigma_\theta = \sigma_\rho - \sigma_T. \end{cases} \quad (5)$$

Решаем систему уравнений (5), подставляя значения σ_θ

$$\sigma_\rho - \sigma_T = \frac{\rho d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho. \quad (6)$$

С учетом граничных условий, выражение (6) примет вид

$$-\sigma_T = \frac{\rho d\sigma_\rho}{d\rho}. \quad (7)$$

Преобразуем выражение (7) и проинтегрируем обе его части в пределах от r до ρ

$$\int_r^\rho \frac{d\rho}{\rho} = -\frac{1}{\sigma_T} \int d\sigma_\rho. \quad (8)$$

После чего, преобразуем выражение (8) и найдем формулу, показывающую распределение напряжения σ_ρ по изгибаемому сечению

$$\sigma_\rho = -\sigma_T \ln \frac{\rho}{r}. \quad (9)$$

Подставив значение выражения (9) в выражение (3) и проведя математические преобразования, получим формулу для распределения напряжения σ_θ по изгибаемому сечению

$$\sigma_\theta = -\sigma_T \left(\ln \frac{\rho}{r} + 1 \right). \quad (10)$$

В случае классической схемы гибки, где наружные слои растягиваются, а внутренние сжимаются, формулы для нахождения σ_ρ и σ_θ различны для зоны сжатия и растяжения [3]. При реализации процесса гибки со сжатием формулы (9) и (10) справедливо применять для всей толщины заготовки.

Из выражений (9) и (10) видно, что напряжения σ_ρ и σ_θ отрицательны и возрастают по абсолютной величине по мере удаления от

внутренней поверхности заготовки в ее толщину и становятся максимальными на наружной поверхности детали. Таким образом реализуется процесс гибки со сжатием в тангенциальном направлении, который препятствует растяжению и удлинению наружных слоев, и, соответственно, образованию трещин. Подставляя в формулы (9) и (10) значение $\rho_{\phi} = R$ получим соответственно

$$\sigma_{\rho_{\max}} = -\sigma_T \ln \frac{\rho}{r} = -\sigma_T \ln \left(1 + \frac{S}{r} \right); \quad (11)$$

$$\sigma_{\theta_{\max}} = -\sigma_T \left(\ln \frac{R}{r} + 1 \right) = -\sigma_T \left(\ln \left(1 + \frac{S}{r} \right) + 1 \right). \quad (12)$$

Если подставить значения $\sigma_{\rho_{\max}}$ и $\sigma_{\theta_{\max}}$ в уравнение пластичности (3) можно сделать вывод, что проведенный расчет верный.

Напряжения σ_{θ} достигают своего максимального значения на наружной поверхности детали. Связано это с тем, что наружные слои детали стремятся получить растяжение (как при гибке без сжатия). Для препятствия этому растяжению необходимо, чтобы приложенные напряжения сжатия на наружных слоях заготовки были больше напряжений текучести.

Ранее говорилось, что для гибки относительно длинных заготовок, на штамп дополнительно устанавливаются ограничители, препятствующие потере продольной устойчивости изгибаемых полок. В данном случае возможно рассчитать длину полки, при которой произойдет потеря устойчивости, используя формулу Эйлера [4]

$$F_{\text{сж}} \geq \frac{\pi^2 EJ_{\min}}{(\mu l)^2}, \quad (13)$$

где $F_{\text{сж}}$ – сила сжатия пружин, Н; E – модуль продольной упругости, МПа; J_{\min} – минимальный момент инерции сечения, м⁴; μ – коэффициент приведения длины, для рассматриваемого случая $\mu = 2$; l – длина изгибаемой полки, м.

Выполнив преобразования формулы (13), длина изгибаемой полки, при которой произойдет потеря продольной устойчивости, будет равна

$$l \geq \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EJ_{\min}}{F_{сж}}} . \quad (14)$$

Следует отметить, что при проектировании гибочной оснастки по предложенной схеме изгиба в штампе со сжатием, необходимо вычислить наибольшее значение сжимающей силы $F_{сж}$, которое будет зависеть от механических свойств материала, а также размеров поперечного сечения изгибаемого образца. После чего, подставляя все необходимые значения в формулу (14), можно будет сделать вывод о целесообразности установки ограничителей на штамп.

Схема штампа для гибки высокопрочных сталей, предложенная в статье, имеет ряд преимуществ перед штампами для гибки со сжатием, известными ранее. Среди них простота в проектировании и изготовлении, возможность регулирования расстояния между подпружиненными упорами, что позволяет расширить номенклатуру изгибаемых деталей на радиус, равный толщине материала.

Выводы

1. Для реализации процесса гибки со сжатием необходимо применение силовой интенсификации, которая приведет к изменению схемы напряженно-деформированного состояния в изгибаемом полуфабрикate. При этом тангенциальные напряжения σ_{θ} должны быть отрицательны по всему сечению заготовки.

2. Справедливость расчетов напряжений σ_p и σ_{θ} проверяется подстановкой их максимальных значений в уравнение пластичности.

3. При изгибе со сжатием заготовок относительно большой длины произойдет потеря продольной устойчивости, которую можно предусмотреть, предварительно рассчитав допустимую длину изгибаемой полки.

Список литературы

1. **Технические** характеристики стали Miilux Protection / Защитные стали [Электронный ресурс]. URL: <https://www.miilux.fi/ru>.

2. **Романовский, В.П.** Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский; под. общ. ред. Н.З. Симоновского. – Изд. 6-е,

перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.: ил.

3. Попов, Е.А. Технология и автоматизация листовой штамповки: учеб. пособие для вузов / Е.А. Попов, В.Г. Ковалев, И.Н. Шубин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 480 с.: ил.

4. Мовнин, М.С. Основы технической механики: учеб. пособие для техникумов / М.С. Мовнин, А.Б. Израелит, А.Г. Рубашкин. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1990. – 288 с.: ил.