



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-50-55>  
УДК 621.98.04

Поступила 06.12.2019  
Received 06.12.2019

## ТЕХНОЛОГИЯ И ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ГИБКИ ЛИСТОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

*В. А. ТОМИЛО, М. Л. НЕСТЕРОВИЧ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: maxim03021992@gmail.com*

*В статье предложен и теоретически обоснован способ гибки высокопрочных сталей со сжатием. Технология позволяет получать детали из высокопрочных сталей без трещин вдоль линии гибки. В случае изгиба по предложенному способу деформирование осуществляется действием продольной и поперечной силы. Для разработанного способа получены уравнения, показывающие распределение напряжений по сечению в очаге деформации. На основании уравнений распределения напряжений были выведены выражения для нахождения продольной сжимающей силы, при которой нейтральный слой в заготовке переместится на наружную поверхность. Получены выражения для нахождения момента, создаваемого продольной сжимающей силой, а также момента, образованного действием сжимающих напряжений, что позволило найти уравнение для внешнего изгибающего момента при изгибе со сжатием. Выведено уравнение для нахождения плеча действия усилия, создающего внешний изгибающий момент. С учетом выражений для нахождения внешнего изгибающего момента и плеча действия усилия получено уравнение для нахождения усилия на пуансоне при осуществлении изгиба со сжатием.*

**Ключевые слова.** *Способ гибки со сжатием, распределение напряжений, изгибающий момент, плечо силы, усилие гибки со сжатием.*

**Для цитирования.** *Томило, В. А. Технология и инструмент для гибки листов из высокопрочных сталей / В. А. Томило, М. Л. Нестерович // Литье и металлургия. 2020. № 1. С. 50–55. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-50-55>.*

## BENDING TECHNOLOGY OF HIGH STRENGTH STEEL SHEETS AND TOOLS FOR ITS REALIZATION

*V. A. TAMILA, M. L. NESTEROVICH, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: maxim03021992@gmail.com*

*The article proposes and theoretically justifies a method for bending high-strength steels with compression. The technology allows to get parts from high-strength steels without cracks along the bending line. In the case of bending according to the proposed method, the deformation is carried out by the combined action of longitudinal and lateral forces. Equations are derived showing the stress distribution over the cross section in the deformation zone. The article proposes and theoretically justifies a method for bending high-strength steels with compression. The technology allows you to get parts from high-strength steels without cracks along the bending line. In the case of bending according to the proposed method, the deformation is carried out by the action of longitudinal and transverse forces. Equations were derived for finding the longitudinal compressive force at which the neutral layer in the workpiece moves to the outer surface based on the equations of stress distribution. Equations are derived for finding the moment created by the longitudinal compressive force, as well as the moment formed by the action of compressive stresses, which made it possible to derive the equation for the external bending moment during bending with compression. Equation is derived for finding the shoulder of the force action creating an external bending moment. Equation is derived for finding the force of the punch for bending with compression.*

**Keywords.** *The method of bending with compression, stress distribution, bending moment, shoulder strength, bending force with the compression.*

**For citation.** *Tamila V. A., Nesterovich M. L. Bending technology of high strength steel sheets and tools for its realization. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 1, pp. 50–55. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-50-55>.*

В настоящее время при изготовлении усиленных элементов кузовов автомобилей специального назначения применяют высокопрочные стали типа Miilux Protection. Особенность данных сталей состоит в том, что они плохо поддаются операциям холодной обработки давлением, в частности гибке на радиус  $r$ , равный толщине материала  $s$ . Имеет место трещинообразование по линиигиба, что является неисправив-

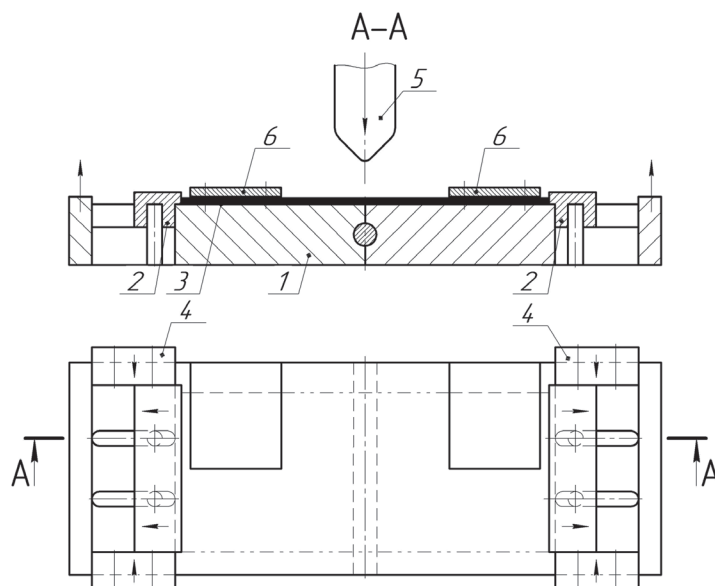


Рис. 1. Схема штампа для гибки высокопрочных сталей с боковыми поджимами: 1 – шарнирная матрица; 2 – упор; 3 – заготовка; 4 – боковой поджим; 5 – пуансон; 6 – ограничитель

мым дефектом. В связи с этим элементы кузовов автомобилей приходится изготавливать по сварному варианту, что существенно влияет на прочностные характеристики деталей по сварному шву и в зоне термического влияния.

Для указанных сталей разработана технология гибки, позволяющая получать детали с радиусом  $r$ , равным толщине материала  $s$ . На рис. 1 показана схема штампа для гибки высокопрочных сталей.

Штамп содержит шарнирную матрицу 1. К матрице с обеих сторон крепятся перемещаемые упоры 2, между которыми укладывается заготовка 3. По краям штампа расположены боковые поджимы 4, которые крепятся к матрице 1 и зажимают упоры. Таким образом, свободное перемещение упоров в продольном направлении отсутствует. Заготовка изгибается пуансоном 5. При гибке заготовок относительно большой длины на матрицу дополнительно устанавливают ограничители 6, препятствующие потере продольной устойчивости.

Штамп работает следующим образом. Заготовку 3 из листового материала укладывают на шарнирную матрицу 1 между упорами 2. После чего упоры фиксируются поджимами 4. При ходе ползуна прессы вниз пуансон 5 начинает изгибать заготовку. Концы изгибаемого полуфабриката начинают давить на упоры и стремятся переместить их в продольном направлении. За счет фиксации поджимами упоров на поверхности их контакта возникает сила трения  $F_{тр}$ , которая препятствует относительно свободному перемещению упоров, таким образом, создавая их противодействие на заготовку. В результате противодействия упоров нейтральный слой в полуфабрикate смещается к наружной поверхности, а заготовка изгибается с напряжениями сжатия в продольном направлении.

Рассмотрим более подробно связи между заготовкой 3, упором 2 и поджимами 4 (рис. 2).

При опускании пуансона вниз заготовка стремится выйти за края матрицы и начинает воздействовать на перемещаемый упор равномерно распределенной нагрузкой  $q$ , суммарно равной силе  $Q$ . От упоров на заготовку начинает воздействовать реактивная сжимающая сила  $F_{сж}$ . Для того чтобы заготовка изгибалась лишь с напряжениями сжатия в продольном направлении, необходимо, чтобы нейтральный слой в ней сместился на наружную поверхность, а это возможно лишь тогда, когда средние сжимающие напряжения (образованные от сжимающей силы) достигнут или будут больше напряжений текучести [1]. Тогда для рассматриваемого случая можно записать

$$Q = F_{сж} = k_0 \sigma_T b S, \quad (1)$$

где  $k_0$  – коэффициент, учитывающий изменение напряжений по сечению;  $\sigma_T$  – предел текучести материала;  $b$  – ширина изгибаемого полуфабриката.

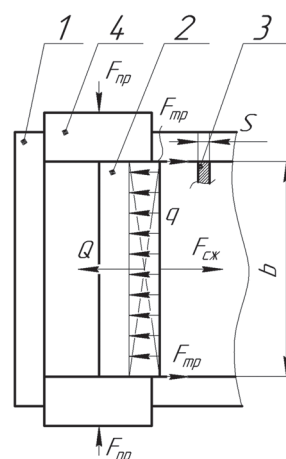


Рис. 2. Схема действия сил на контакте заготовки с деталями штампа

На контакте перемещаемого упора с двух сторон от воздействия поджимов возникает сила трения  $F_{тр}$ , равная:

$$F_{тр} = \mu F_{пр}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения между поджимом и упором;  $F_{пр}$  – сила прижима упора.

Для перемещения упора в продольном направлении, реализуя при этом схему гибки со сжатием, должно выполняться неравенство

$$Q \geq 2F_{тр}. \quad (3)$$

Подставив значение уравнения (1) в (3) и с учетом (2), можно записать

$$F_{пр} \geq \frac{k_0 \sigma_T b S}{2\mu}. \quad (4)$$

Уравнение (4) показывает усилие прижима перемещаемого упора, необходимое для реализации процесса изгиба со сжатием в штампе, изображенном на рис. 1.

Предлагаемый способ гибки является примером изгиба действием поперечной и продольной силы. Преобладающее влияние на процесс деформирования в данном случае оказывает поперечная сила – пуансон воздействует усилием на заготовку, торцы которой стремятся выйти за края матрицы, при этом, упираясь в поджатые упоры, создают реактивную продольную сжимающую силу  $F_{сж}$ . В связи с этим предельный момент (внешний изгибающий момент) пластического изгиба, возникающий от усилия на пуансоне  $P_{п}$ , равен [2]:

$$M = P_{п} l / 2, \quad (5)$$

где  $l$  – плечо, на котором действует сила  $P_{п}$ .

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. Именно удлинение и растяжение наружных слоев при гибке является причиной трещинообразования высокопрочных листовых материалов [3].

Действие продольной сжимающей силы  $F_{сж}$  создает препятствие деформированию заготовки и отражается на распределении напряжений по толщине заготовки, а именно образованные ее действием сжимающие напряжения накладываются на различные напряжения, получающиеся при изгибе, и дают измененную схему распределения напряжений по сечению, что препятствует образованию трещин. Причем, как говорилось ранее, если напряжения, образованные от  $F_{сж}$ , достигнут или будут больше напряжений текучести, то нейтральный слой в заготовке переместится на наружную поверхность ( $\rho_n = R$ ). Схема напряженного и деформированного состояния при изгибе со сжатием показана на рис. 3.

Тогда из условия, при котором сумма моментов, действующих на заготовку в рассматриваемом сечении равна нулю, можно записать [3]

$$M = M_{\sigma_\theta} - M_{F_{сж}}, \quad (6)$$

где  $M_{F_{сж}}$  – момент, создаваемый продольной силой  $F_{сж}$ , приложенной к заготовке;  $M_{\sigma_\theta}$  – момент, создаваемый напряжениями  $\sigma_\theta$ .

Для отыскания значений моментов, создаваемых продольной силой  $F_{сж}$  и напряжениями  $\sigma_\theta$ , необходимо знать распределение напряжений по сечению при изгибе со сжатием. Поэтому примем, что изгиб происходит без упрочнения, а ширина заготовки больше ее толщины в несколько раз. В таком случае деформации в направлении ширины затруднены и можно считать, что на большей части изгибаемой заготовки (кроме краев) возникает плоское деформированное состояние, при котором [4]

$$\sigma_z = \frac{1}{2}(\sigma_\rho + \sigma_\theta), \quad (7)$$

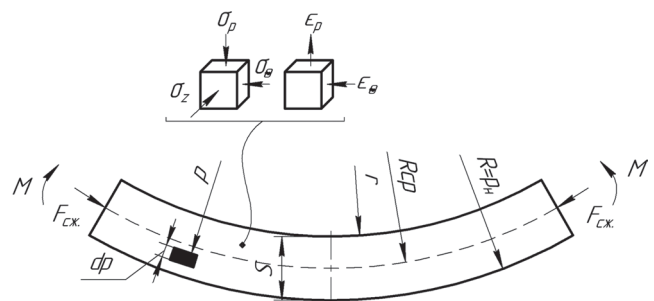


Рис. 3. Схема напряженного и деформированного состояния при изгибе со сжатием

где  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\rho$ ,  $\sigma_\theta$  – соответственно напряжения, действующие вдоль ширины заготовки, в радиальном и тангенциальном направлениях.

Выделим в очаге деформации элемент размером  $d\rho$  и запишем для него уравнение равновесия [4]

$$\frac{\rho d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0. \quad (8)$$

Напряжения  $\sigma_\rho$  и  $\sigma_\theta$  отрицательны, поэтому по гипотезе максимальных касательных напряжений уравнение пластичности запишется в виде [4]

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \sigma_T. \quad (9)$$

При совместном решении (8) и (9) и использовании граничных условий, по которым  $\sigma_\rho = 0$  при  $\rho = r$ , получим уравнения, показывающие распределение напряжений по толщине:

$$\sigma_\rho = -\sigma_T \ln \frac{\rho}{r},$$

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

Зная уравнения для распределения напряжений по изгибаемому сечению, воспользуемся методикой Н. И. Безухова для отыскания значений, составляющих выражения (6). При одновременном действии внешнего момента поперечных сил и продольной сжимающей силы интегральная сумма тангенциальных напряжений будет равна продольной сжимающей силе [3]. При этом характер функциональной зависимости  $\sigma_\theta = f(\rho)$  не изменяется по сечению в процессе изгиба, так как реализуется схема гибки со сжатием, поэтому интеграл не разбивается на два выражения. В связи этим интегрирование проводим в пределах от  $r$  до  $R = \rho_H$ :

$$F_{сж} = \int_r^{R=\rho_H} \sigma_\theta b d\rho. \quad (10)$$

Подставляя значение  $\sigma_\theta$  под интеграл (10), произведем незначительные математические преобразования и найдем значение  $F_{сж}$ :

$$F_{сж} = -\sigma_T \int_r^{R=\rho_H} \left( \ln \frac{\rho}{r} + 1 \right) b d\rho = -\sigma_T b R \ln \frac{R}{r} = -\sigma_T b \rho_H \ln \frac{\rho_H}{r}. \quad (11)$$

Если принять, что изменение толщины заготовки в процессе деформирования ничтожно мало, а изгиб производится на радиус, равный толщине материала, то можно записать

$$R = r + s = 2s = 2r. \quad (12)$$

В таком случае уравнение (11) примет вид

$$F_{сж} = -1,38\sigma_T s b.$$

Здесь число 1,38 и есть значение коэффициента  $k_\theta$ , упоминаемого в уравнении (1).

Зная  $F_{сж}$  и с учетом (12), можно записать, что величина момента, образованного продольной сжимающей силой относительно центра кривизны нейтральной поверхности заготовки, будет равна [3]

$$M_{F_{сж}} = F_{сж} \rho_H = |R = \rho_H| = -2,76\sigma_T s^2 b.$$

Величина момента, образованного напряжениями  $\sigma_\theta$  с учетом (12), определяется уравнением [3]

$$M_{\sigma_\theta} = \int_r^{R=\rho_H} \sigma_\theta \rho b d\rho = -\sigma_T \int_r^{R=\rho_H} \left( \ln \frac{\rho}{r} + 1 \right) \rho b d\rho = -2,14\sigma_T s^2 b.$$

В таком случае, подставляя значения  $M_{\sigma_\theta}$  и  $M_{F_{сж}}$  в (6), получаем уравнение для внешнего изгибающего момента при изгибе со сжатием:

$$M = 0,62\sigma_T s^2 b.$$

Так как предельный момент пластического изгиба равен уравнению (5), то возможно определить значение усилия на пуансоне. Однако в этом случае возникают определенные трудности для отыскания плеча  $l$ . На рис. 4 показана расчетная схема для отыскания плеча  $l$  на границе контактного участка.

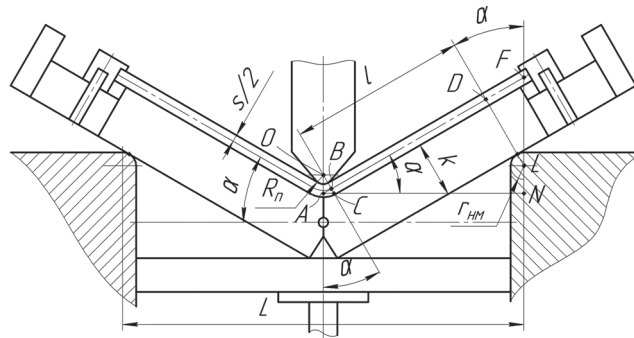


Рис. 4. Расчетная схема для отыскания плеча действия усилия, создающего изгибающий момент

Как видно из рисунка, плечо  $l$  равно некоторой длине гипотенузы  $AF$  треугольника  $AFN$ . Поэтому для отыскания плеча  $l$  необходимо найти величину отрезков  $AB$  и  $DF$ . Для отыскания отрезка  $AB$  рассмотрим треугольник  $AOB$ , тогда можно записать

$$AB = \left( R_{\text{п}} + \frac{s}{2} \right) \text{tg } \alpha.$$

где  $R_{\text{п}}$  – радиус пуансона:  $R_{\text{п}} = s$ .

Из треугольника  $LDF$  запишем

$$DF = \left( \frac{s}{2} + k + r_{\text{HM}} \right) \text{tg } \alpha,$$

где  $k$  – толщина поворотной матрицы;  $r_{\text{HM}}$  – радиус направляющей матрицы.

Из треугольника  $AFN$  отрезок  $AF$  равен:

$$AF = \frac{L}{2 \cos \alpha}.$$

Тогда, зная величины  $AB$ ,  $DF$ ,  $AF$ , найдем величину плеча  $l$ :

$$l = \frac{L}{2 \cos \alpha} - \left( R_{\text{п}} + \frac{s}{2} \right) \text{tg } \alpha - \left( \frac{s}{2} + k + r_{\text{HM}} \right) \text{tg } \alpha = \frac{1}{\cos \alpha} \left( \frac{L}{2} - \sin \alpha (2s + k + r_{\text{HM}}) \right).$$

Величина плеча  $l$  позволит определить значение усилия на пуансоне  $P_{\text{п}}$ . Тогда, подставляя значение для внешнего изгибающего момента и значение плеча  $l$ , уравнение для усилия на пуансоне примет вид

$$P_{\text{п}} = \frac{1,24 \sigma_{\text{T}} s^2 b \cos \alpha}{\left( \frac{L}{2} - \sin \alpha (2s + k + r_{\text{HM}}) \right)}. \quad (13)$$

Уравнение (13) показывает изменение усилия по ходу деформирования. При дальнейшем исследовании его на экстремум возможно будет определить максимальные силы реакции опоры, что необходимо для прочностного расчета деталей штампа и выбора оптимального материала для их изготовления.

### Выводы

1. Для соблюдения условий гибки со сжатием по предлагаемой технологии необходимо соблюсти усилие прижима, определяемое согласно уравнению (4), в противном случае изгиб высокопрочных сталей будет происходить с образованием трещин.

2. Предложенный способ является примером изгиба одновременным действием продольных и поперечных сил, где преобладающее влияние имеет поперечная сила, возникающая от действия гибочного пуансона.

3. Усилие, необходимое для осуществления процесса изгиба со сжатием, когда радиус гибки равен толщине материала, определяется согласно уравнению (13).

### ЛИТЕРАТУРА

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

2. **Романовский В. П.** Справочник по холодной штамповке/ В. П. Романовский. Изд. 6-е, перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. 520 с.
3. **Попов Е. А.** Основы теории листовой штамповки: учеб. пособ. для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.
4. **Зубцов М. Е.** Листовая штамповка: учеб. пособ. для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. 432 с.

#### REFERENCES

1. **Popov E. A., Kovalev V. O., Shubin I. N.** *Tehnologiya i avtomatizaciya listovoi shtampovki* [Technology and automation of sheet metal stamping]. Moscow, MGTU im. Baumana Publ., 2000, 480 p.
2. **Romanovski V. P.** *Spravochnik po holodnoi shtampovke* [Cold stamping guide]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979, 520 p.
3. **Popov E. A.** *Osnovy teorii listovoi shtampovki* [The basics of sheet metal stamping theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 278 p.
4. **Zubcov M. E.** *Listovaya shtampovka* [Sheet metal stamping]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1980, 432 p.