

Технология судостроения и организация судостроительного производства

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2021-1-4>
УДК 658(075.32); 65.04.56

С.В. Власов, Н.А. Елатонцев

ВЛАСОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ – к.т.н., доцент Политехнического института
(автор, ответственный за переписку), vsv-57@mail.ru

Дальневосточный федеральный университет

ЕЛАТОНЦЕВ НИКОЛАЙ АНАТОЛЬЕВИЧ – технический директор, АО «Восточная верфь»
v_verf_to@mail.ru

Владивосток, Россия

Баланс напряжений и деформаций при холодной гибке листовой судостроительной стали

Аннотация: Изложен процесс разработки и внедрения авторами руководящего документа РД 5.05.08.04-20 «Методика разработки технологической инструкции на холодную гибку деталей из листовой судостроительной стали» в корпусном производстве АО «Восточная верфь» (Владивосток). Содержит результаты теоретических и практических исследований процессов, происходящих в структуре судостроительной стали нормальной и повышенной прочности при угловой и циркульной гибке деталей корпусов морских объектов. Приводятся расчётные формулы для назначения рабочих параметров гидропрессового оборудования и технологической оснастки. Предложенный авторами новый подход в процессе технологической подготовки производства позволил моделировать параметры прессового оборудования и оснастки для угловой гибки, с применением которой исключается образование дефектов. Предварительные расчёты необходимой мощности пресса позволяют использовать менее энергозатратное оборудование с уменьшением мощности на 25%. При этом расчётный выбор технологической оснастки позволяет сократить число рабочих циклов кромкогибочного пресса в два раза.

Ключевые слова: пластическая деформация, угловая гибка, циркульная гибка, усилие пресса, параметры пресс-формы, параметры пуансона

Введение

Одна из наиболее проблемных технологических операций в корпусном производстве АО «Восточная верфь» – холодная гибка судостроительной стали, что усугубляется отсутствием технологической преемственности в обслуживании процессов производства, морально и физически устаревшим оборудованием и отсутствием своих подготовленных специалистов. Приглашенные из других стран рабочие имеют соответствующие навыки по гибке стали, но делают это, особо не заботясь ни о затратах на операции, ни о качестве результатов. На практике технологические приёмы видоизменения стального проката, которые они применяют, можно назвать «делаем, на чём есть и как умеем!». Эти приемы, мягко говоря, далеко не всегда соответствуют основным нормативам: РД 5.9091-88 «Технология изготовления корпусных деталей», ОСТ 5.9526-87 «Резка тепловая металлов. Типовые технологические процессы», ОСТ 5.9324-89 «Точность изготовления узлов и секций корпуса», ОСТ 5Р.9091-2002 «Изготовление стальных деталей корпусов металлических судов», ОСТ 5.9912-83 «Корпуса стальных надводных судов. Типовые технологические процессы изготовления узлов и секций корпуса», ОСТ 5.9092-91 «Корпуса стальных судов. Основные положения по технологии изготовления», ОСТ

© Власов С.В., Елатонцев Н.А., 2021

Статья: поступила 14.09.2020; рецензии: 20.09.2021 и 17.12.2021; принята: 05.03.2021; финансирование: Дальневосточный федеральный университет

5.9324-89 «Комплексная система контроля качества. Корпуса металлических судов. Точность изготовления узлов и секций. Технические требования».

Цели и задачи научно-технологической разработки

Гибке стали посвящен большой ряд работ (см., например, [1–6, 8–14]), применить которые в каждом конкретном производстве не представляется возможным ввиду большой номенклатуры изделий и деталей, получаемых из разных марок судостроительной стали.

В течение лета 2020 г. технологическая группа под руководством авторов настоящей статьи занималась проблемой совершенствования процесса подготовки производства технологических операций холодной гибки судостроительной стали в корпусном производстве АО «Восточная верфь».

Основной целью этого процесса (следовательно, и данной статьи) была разработка и проверка на сходимость с практикой алгоритмов моделирования нагрузок и геометрии унифицированных комплектов технологической оснастки для режимов холодной гибки определённых марок стали в соответствующих диапазонах их толщин. Обязательным условием было следующее: гибка должна выполняться как на оборудовании с «ручным управлением», так и на станках с ЧПУ, при этом известна их комплектация технологической оснасткой, способной обеспечивать смоделированные расчётные параметры погиби.

Прежде всего нам необходимо решить следующие задачи для подготовки технологических процессов холодной гибки судостроительной стали.

1. Согласно с номенклатурой изделий корпусного цеха, в первом приближении смоделировать алгоритм выбора мощности гидропрессового оборудования и геометрических параметров технологической оснастки. Все детали корпусов морских объектов на этом предприятии изготавливаются из базовых марок листовой судостроительной стали нормальной и повышенной прочности (табл. 1) [7].

Таблица 1

Механические свойства при растяжении для проката из корпусной стали
(по ГОСТ 52927-2015)

Марки стали	Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	Предел текучести σ_T , Н/мм ²	Относительное удлинение δ , %
Сталь нормальной прочности базовых марок			
A, B, D, E	400÷520	235	22
Сталь повышенной прочности базовых марок			
A27S, D27S, E27S	400÷540	265	22
A32, D32, E32	440÷570	315	22
A36, D36, E36	490÷630	355	21
A40, D40, E40	510÷660	390	20
A40S, D40S, E40S	530÷690	390	20

2. Вторая задача – проверка гипотезы: преобразовав формулу «котельных напряжений» для четверти окружности, можно получить математическую модель, которая даст возможность смоделировать любой из входящих в формулу параметров угловой гибки. Эта задача связана с оценкой потенциальных возможностей конкретной технико-технологической инфраструктуры корпусного производства на постройку новых проектов морских объектов.

Теоретические предпосылки разработки алгоритма решения задачи

По определению академика Ю.А. Шиманского, предел текучести σ_T судостроительной стали – основной показатель её механических качеств, который непосредственно входит в расчётные формулы прочности конструкций МО и, следовательно, предопределяет их вес или

массу [1]. Такая роль, отводимая пределу текучести в расчётах прочности конструкций МО, объясняется следующим:

- при напряжениях, превышающих предел текучести стали, все формулы, применяемые для расчёта прочности конструкций МО, уже перестают отображать действительную картину распределения усилий и напряжений в сечениях конструкций и, следовательно, теряют свою точность и достоверность;

- расчёты прочности конструкций при их работе в зоне пластических деформаций стали, связаны со значительными теоретическими сложностями (например, расчёт прочности по предельным состояниям).

Наиболее сложные физические процессы происходят при угловой гибке листовой стали на 90° и более, выполняемой на кромкогибочном прессе. В поперечном сечении образца от внешней поверхности загиба до нейтральной оси формируется обширная область растяжения (см. рис. 1).

От внутренней поверхности загиба до нейтральной оси формируется незначительная область сжатия, поэтому процесс угловой гибки сопровождается образованием двух противоположно направленных систем скольжения в кристаллической решётке образца [14]. При угловой и циркульной гибке в результате воздействия рабочего инструмента пуансона зона растяжения волокон стали в вертикальной плоскости стремится к максимуму, а зона сжатия к минимуму, в результате нейтральная ось максимально приближена к внутренней плоскости образца (рис. 1).

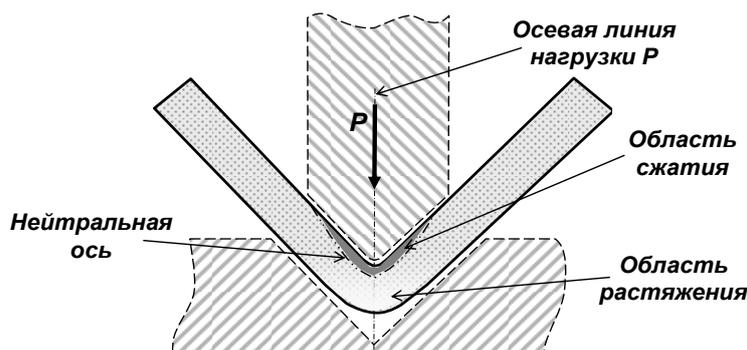


Рис. 1. Схема угловой гибки на 90°

На диаграмме растяжения образца (рис. 2), можно выделить три характерных участка. Участок OA – прямолинейный, соответствующий упругой деформации стали при возрастании нагрузки P [2, 3]. После снятия этой нагрузки конфигурация образца возвращается в исходное состояние. Эта область деформаций $(0,6 \div 0,8) P_T$ является основным полем исследования проектировщиков судовых конструкций, где упругие свойства стали существенно зависят от геометрических характеристик поперечного сечения образца, момента инерции и момента сопротивления, которые определяются относительно нейтральной оси, т.е. условной линии, разделяющей области растяжения и сжатия стали. А зависимость между нагрузкой P и абсолютным упругим удлинением образца Δl в области упругой деформации (участок OA на рис. 2) пропорциональна и известна как закон Гука

$$P = k\Delta l$$

где $k = EF_0/l_0$ – коэффициент, зависящий от геометрии образца, т.е. площади поперечного сечения F_0 и длины l_0 и свойств материала E – модуля нормальной упругости.

С точки зрения технологии судостроения нас интересует участок AB – криволинейный, соответствующий пластической и упругопластической деформации [11]. На этом участке после снятия нагрузки P конфигурация образца полностью или частично остаётся в деформированном состоянии. Здесь проявляется участок удлинения, которое характеризует весьма важное свойство металла – его способность претерпевать локальные пластические деформации.

В образце судостроительной стали нормальной прочности (рис. 2, фрагмент *а*) при переходе от упругой к пластической деформации проявляется небольшой горизонтальный участок *AA'*, который называется площадкой текучести при нагрузке P_T . После снятия этой нагрузки конфигурация образца остаётся в деформированном состоянии без разрушения.

В образце судостроительной стали повышенной прочности при переходе от упругой к упругопластической деформации проявляется криволинейный участок *AB*, который демонстрирует нелинейный характер текучести стали при нагрузке, превышающей P_T (рис. 2, фрагмент *б*). После снятия этой нагрузки конфигурация образца остаётся в деформированном и структурно неустойчивом состоянии, т.е. с пониженной прочностью и твёрдостью, но увеличенной пластичностью образца в районе погиби. Для восстановления механических свойств стали необходимо провести термическую обработку с нагревом до температуры рекристаллизации.

На участке *OAB* (рис. 2, фрагмент *б*) деформация распределяется по всей длине испытуемого образца, а на криволинейном участке *BC* практически вся деформация сосредотачивается в зоне локального сужения – это предмет исследования в технологиях по холодной обработке.

Если приложенное усилие P небольшое, то возникает упругая деформация образца Δl , исчезающая после снятия этого усилия. Форма и размеры образца не изменяются. Если приложенное усилие возрастет, то в образце возникнут напряжения, превышающие предел упругости ($P_T > \sigma_{упр}$), и будет наблюдаться пластическая деформация стали.

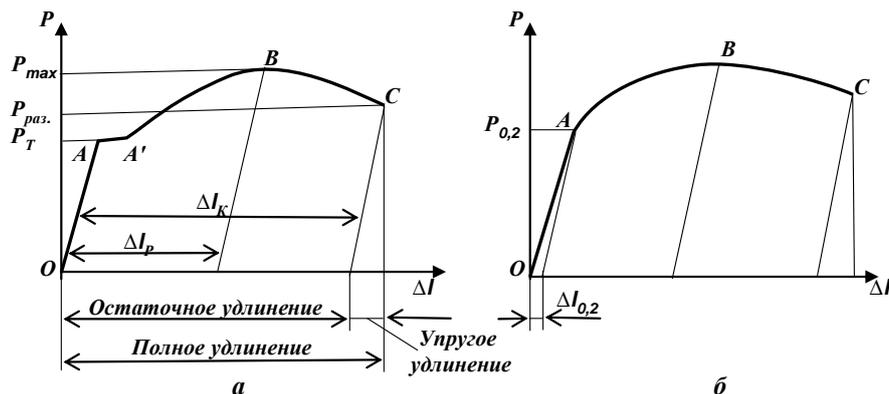


Рис. 2. Схема первичных (машинных) диаграмм растяжения образцов углеродистых и низколегированных углеродистых судостроительных сталей категории *A, B, D, E* и *F*: а – с площадкой текучести; б – без площадки текучести

После снятия нагрузки форма и размеры образца изменяются. Это явление объясняется тем, что с увеличением нагрузки в стали происходит смещение, или текучесть, атомов из положения равновесия. Когда упругое напряжение превзойдет определённую величину – предел упругости $\sigma_{упр}$, то смещение некоторых атомов достигает состояния, когда после снятия нагрузки они не могут занять исходное положение [9]. Такое смещение и вызывает необходимую нам остаточную пластическую деформацию, что и подразумевается под термином «текучесть судостроительной стали» σ_T . Если эту деформацию превысить на указанную величину, то только в отдельных зёрнах можно наблюдать следы скольжения в виде прямых линий – волокон, которые в пределах зёрен одинаково ориентированы.

При гибке судостроительной стали разнонаправленная деформация происходит неравномерно. В зоне сжатия с увеличением степени деформации происходит концентрация деформаций в отдельных избранных зёрнах. Следовательно, существует критическая степень деформации металла $\epsilon_{кр}$, которая может привести к нежелательному образованию крупнозернистой структуры. Критическая степень деформации крайнего растянутого волокна образуется при нагрузках, превышающих предел текучести судостроительной стали на 3÷7%. При угловой и циркульной гибке необходимо избегать этой степени деформации.

Гибка судостроительной стали

Пластическая деформация судостроительной стали всех категорий при холодной гибке может вызывать незначительный наклёп, который, в зависимости от величины и характера деформации, может влиять на механические свойства стали, прежде всего на характеристики пластичности и ударной вязкости [6].

Циркулярная гибка – по постоянному или переменному радиусу (см. рис. 3). Величина деформации внешнего крайнего растянутого волокна в детали не должна превышать 5÷6%. Поэтому циркулярная гибка на кромкогибочном прессе при внутренних радиусах погиби детали с $R \geq 300$ мм включительно не оказывает существенного влияния на механические свойства судостроительной стали всех категорий [11].

Угловая гибка стали нормальной и повышенной прочности (см. рис. 4) при радиусе поверхности рабочего инструмента пуансона или внутреннем радиусе загиба r , равном полуторной – двойной толщине листа s , т.е. $2,0 s \geq r \geq 1,5 s$, при углах менее 90° приводит к снижению значений удлинения и ударной вязкости в загибе ниже норм, установленных в ГОСТ Р 52927-2015.

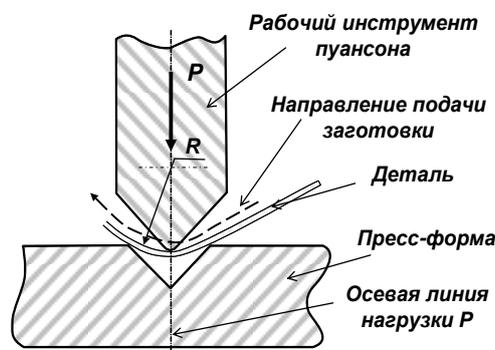


Рис. 3. Циркулярная гибка на кромкогибочном прессе

Холодная угловая гибка с радиусом рабочего инструмента пуансона r (рис. 4), равным или меньшим полуторной толщине листа s , или $r \leq 1,5 s$, приводит к тому, что величина деформации внешнего крайнего волокна даже при небольших углах погиби (до $\sim 15^\circ$) может превышать «критическую» степень.

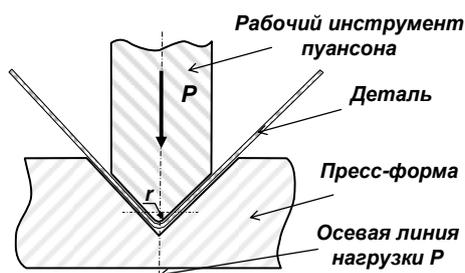


Рис. 4. Угловая гибка на кромкогибочном прессе

Размеры заготовок для циркулярной и угловой гибки судостроительной стали

Циркулярная гибка на кромкогибочном и валковом прессах до размера, установленного по внешней поверхности детали [13]. В этом случае наибольшая зона деформации или растяжения волокон происходит по поверхности, образующейся радиусом R (см. рис. 5) и, уменьшаясь, практически сходит на нет к поверхности, образующейся радиусом r .

Ширина внешней B поверхности заготовки детали круглой формы по внешнему радиусу R (рис. 5) рассчитывается как $B = 2\pi R$. По внутреннему радиусу r ширина внутренней b поверхности определяется как $b = 2\pi r$. Фактическая ширина заготовки для детали круглой формы, определяемая по параметру внешнего радиуса погиби, должна быть уменьшена на Δb ,

где $\Delta b = B - b = 2\pi R - 2\pi r$.

Если уменьшение длины заготовки Δb отнести к её толщине s , то:

- ширина заготовки b для детали круглой формы с внешним радиусом R (рис. 5) будет определяться как $b \approx 2\pi R - 6s$;
- ширина заготовки b для детали формой в три четверти окружности с внешним радиусом R будет определяться как $b \approx 1,5\pi R - 4,5s$;
- ширина заготовки b для детали формой в половину окружности с внешним радиусом R будет определяться как $b \approx \pi R - 3s$;
- ширина заготовки b для детали формой в одну четверть окружности с внешним радиусом R будет определяться как $b \approx 0,5\pi R - (1,5 \div 2) s$ (рис. 5).

Если на заготовке детали выполнить несколько параллельных загибов через интервал $t = 2s$ на протяжении $T = \frac{1}{4}(2\pi R)$ под углом α , который отвечает условию $180^\circ > \alpha > 90^\circ$ (рис. 6), то получим циркульную гибку детали с постоянным радиусом R и общим расположением прямых плоских сторон детали под заданным углом.

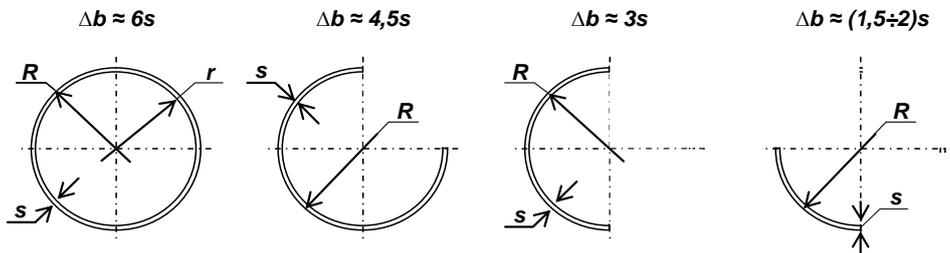


Рис. 5. Пластические параметры циркульной гибки детали

Заданный угол будет определяться как сумма углов погиби Σ_{α_n} , угловой гибкой с относительным отклонением каждой из сторон детали $180^\circ > \alpha_n > 90^\circ$. По линии нулевой разметки 0 (см. рис. 6) выполняется загиб на прессе с углом $\alpha \approx 135^\circ$.

Каждая из сторон заготовки получит угол равный $135^\circ/2 = 67,5^\circ$ относительно горизонтальной плоскости. Следующий загиб, на $\alpha \approx 135^\circ$, выполняется по линии 2 (рис. 6). В результате стороны заготовки относительно друг друга будут находиться под углом $180^\circ - 67,5^\circ = 112,5^\circ$. Третий загиб по линии 4 приведёт к тому, что стороны заготовки относительно друг друга будут находиться под углом $180^\circ - 67,5^\circ - 67,5^\circ = 45^\circ$. Выполнив загибы по линиям 1 и 3, получим, что плоские стороны заготовки относительно друг друга будут находиться под углом $45^\circ + 45^\circ = 90^\circ$. Радиус погиби будет определяться как

$$R = (2 t \times \Sigma_{\alpha_n}) / \pi = (4 s \times \Sigma_{\alpha_n}).$$

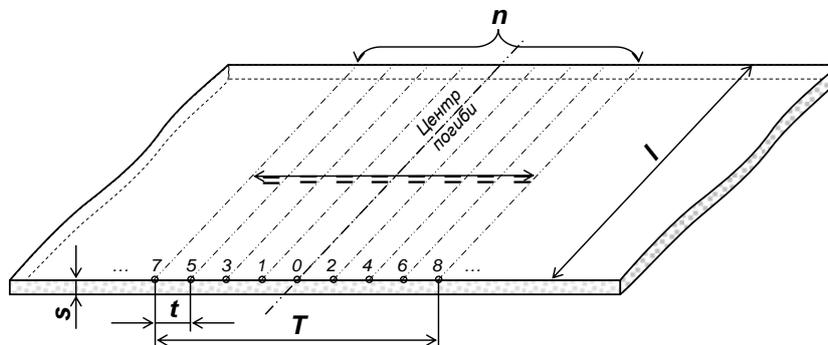


Рис. 6. Схема разметки заготовки детали при циркульной гибке по одному (постоянному) радиусу R

Угловая гибка. Размер заготовок для деталей при угловой гибке (рис. 7) до проектных размеров B_1 и B_2 , установленных по внешней поверхности детали. Зона наибольшей деформации или растяжения волокон будет также распространяться по внешней поверхности детали,

образованной радиусом R и, уменьшаясь, практически сходить на нет к внутренней поверхности, образованной радиусом r [10]. Поэтому для того чтобы получить деталь со сторонами B_1 и B_2 , загнутыми на кромкогибочном прессе относительно друг друга на угол в 90° , ширина её заготовки b должна рассчитываться как

$$b = b_1 + b_2 = (B_1 - s) + (B_2 - s) = (B_1 + B_2) - 2s.$$

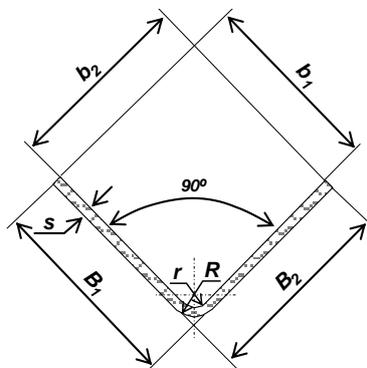


Рис. 7. Пластические параметры угловой гибки детали

С уменьшением угла загиба между сторонами B_1 и B_2 менее чем в 90° ширину заготовки детали b можно рассчитывать как

$$b = B_1 - 0,75s + B_2 - 0,75s = B_1 + B_2 - 1,5s.$$

Расчёт рабочих параметров гидропрессового оборудования и технологической оснастки

Загиб – это результат приложения усилия P , вызывающего пластическую деформацию, соответствующую пределу текучести σ_T данной категории или марки стали. Пластическая деформация происходит в области растяжения (см. рис. 1), где её минимальное значение находится у нейтральной оси, а максимальное приближается к внешней поверхности [4].

Усилие P , необходимое для гибки сторон детали под угол в 90° , определяемое по радиусу внешней поверхности загиба R (рис. 8). Критическая степень деформации крайнего волокна, которая находится в зоне предела текучести $1,05\sigma_T$ соответствующей марки стали, образуется в $1/4$ части окружности радиуса R , по внешней поверхности загиба и описывается формулой «котельных напряжений» [12]:

$$1,05 \sigma_T = \frac{P \times R}{s},$$

где $1,05 \sigma_T$ – средняя условно допустимая «критическая» степень деформации внешнего крайнего волокна (на $3 \div 7\%$ выше предела текучести соответствующей категории или марки судостроительной стали), $\text{кг}/\text{см}^2$;

P – давление рабочего инструмента пуансона, $\text{кг}/\text{см}^2$;

R – радиус внешней поверхности загиба, мм;

s – толщина образца, мм.

Следовательно, нагрузка P , необходимая для угловой гибки, будет прямо пропорциональна пределу текучести σ_T и толщине s выбранной марки стали и обратно пропорциональна внешнему радиусу загиба R , т.е.

$$P = \frac{1,05\sigma_T \times s}{R}.$$

Давление P , необходимое для гибки сторон детали под угол в 90° , определяемое по радиусу внутренней поверхности загиба, равного радиусу рабочей поверхности пуансона r (см. рис. 8), определяется как

$$P = \frac{1,05\sigma_T \times s}{(r + s)}$$

где r – радиус внутренней поверхности загиба, равный радиусу рабочей поверхности пуансона r .

Давление рабочего инструмента пуансона P , действующего на деталь, распределяется равномерно по площади S деформированной поверхности детали [5]. Следовательно, минимальная нагрузка, которую должен создать пресс $P_{ПР}$ (см. рис. 8), будет определяться как

$$P_{ПР} = P \times S = P \times (\frac{1}{2}\pi r \times l),$$

где S – площадь деформированной поверхности загиба детали по внутреннему радиусу r ; l – длина деформированной поверхности загиба детали, мм.

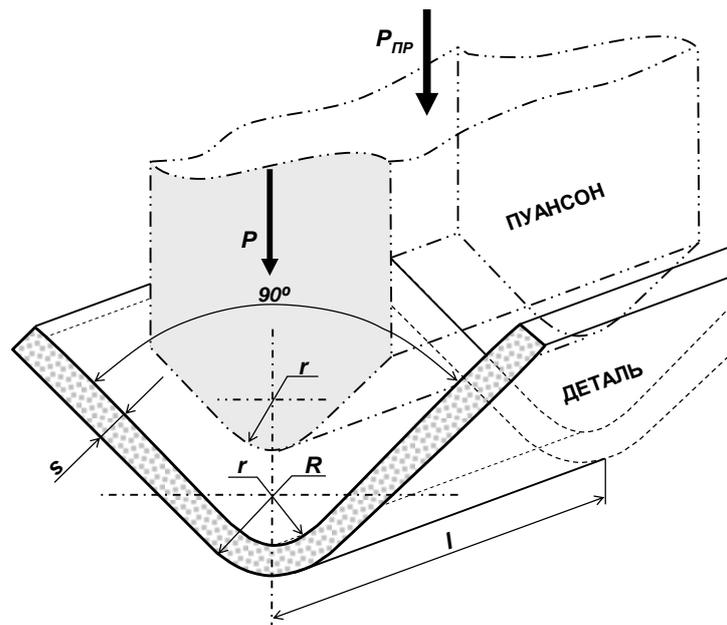


Рис. 8. Параметры детали для определения усилий угловой гибки

Нагрузка, которую должен создать пресс $P_{ПР}$ при угловой гибке стальной заготовки, прямо пропорциональна пределу текучести σ_T выбранной марки стали, радиусу рабочей поверхности пуансона r , толщине s и длине l заготовки детали и обратно пропорциональна внешнему радиусу поверхности углового загиба детали R , т.е.

$$P_{ПР} = (1,65 \sigma_T \times r \times s \times l) / R.$$

В зависимости от мощности, которую способен создавать пресс $P_{ПР}$, действуя на рабочий инструмент (или оснастку) пуансона, данная математическая модель усилий и деформаций позволяет смоделировать практически любой из входящих в вышеуказанную формулу пяти параметров угловой гибки судостроительной стали.

Однако такие параметры, как марка стали и её σ_T , радиус загиба R или r , толщина s и длина l детали, задаются в рабочей конструкторской документации. Разработка технологической инструкции для проведения операции угловой гибки заключается в назначении следующих параметров: мощности прессы $P_{ПР}$, нагрузки рабочего инструмента пуансона P и геометрических параметров рабочей поверхности пресс-формы или матрицы (рис. 9), т.е. её ширину d и глубину h и необходимый рабочий угол загиба заготовки α .

Если принять минимальную глубину рабочей поверхности пресс-формы (рис. 9) как

$$h_{min} \approx (1,5 \div 2,0) R,$$

то её минимальная ширина будет составлять

$$d_{min} = 2,0h \approx 3R.$$

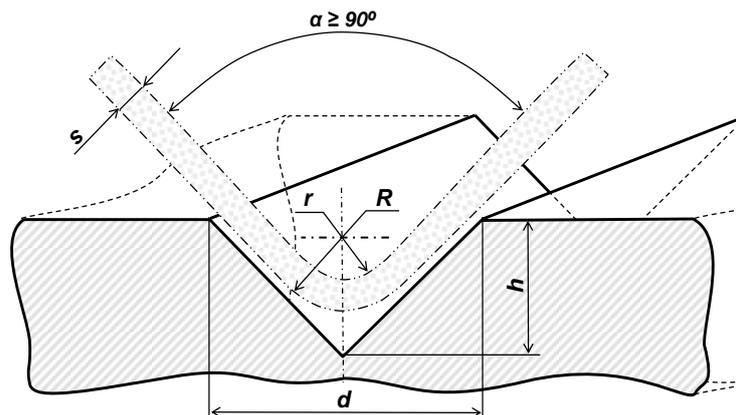


Рис. 9. Параметры пресс-формы для угловой гибки

Исходя из условия, что внутренний радиус углового загиба r под $\alpha = 90^\circ$, без превышения критической степени деформации по внешней поверхности, образованной радиусом R , необходимо удерживать в пределах $r \approx (1,5 \div 2,0) s$, в процессе угловой гибки деталей с радиусом внешнего загиба $R \geq 2s$, ширина пресс-формы должна быть не менее

$$d_{min} = 3R \approx (7,5 \div 9,0) s \approx 8 s.$$

Проверка алгоритма решения задачи

Для проверки сходимости результатов теоретических предпосылок выполнен и проанализирован ряд наблюдений за ходом и последовательностью технологических процессов холодной угловой и циркульной гибки судостроительной стали нормальной и повышенной прочности. Преобразование стальных заготовок в детали корпуса МО производилось производственным персоналом корпусного цеха АО «Восточная верфь» [8]. В первом случае без технологической подготовки, т.е. методом случайного подбора технологической оснастки (см. пример 1), а во втором – с учётом предварительных расчётов соответствующих параметров гибки по приведённой выше методике (см. пример 2).

Пример 1. Для опытного технологического процесса угловой гибки под прямой угол одного комплекта деталей мы установили следующую технико-технологическую инфраструктуру.

1. *Технологическое оборудование* – гидравлический кромкогибочный пресс с суммарной мощностью усилия на пуансон от двух гидроцилиндров $P_{ПР} \approx 250 \div 280$ т.
2. *Технологическая оснастка* – длина рабочей поверхности пуансона $L = 4000$ мм, рабочий радиус пуансона $r = 2$ мм (без технологической насадки), длина, ширина и глубина рабочей поверхности пресс-формы – соответственно $L = 4000$ мм, $d \approx 42$ мм, $h \approx 30$ мм.
3. *Комплект деталей* – заготовки из листовой стали повышенной прочности ГОСТ Р 52927-2015, категория D, марка стали D32S, толщина $s = 8$ мм, средняя длина линии погиба одной заготовки $l = 900$ мм.
4. Количество рабочих циклов пресса – на одну деталь 2 цикла.
5. Результат опытного технологического процесса холодной гибки комплекта деталей – фактический внешний радиус загиба $R \approx 25$ мм, фактический внутренний радиус загиба с учётом упругопластической деформации (рис. 10) $r = R - s = 25 - 8 = 17$ мм, или $r = 1,7$ см.
6. Фактическое усилие $P_{ПР}$, созданное прессом в процессе гибки:

$$P_{ПР} = (1,65 \sigma_T \times r \times s \times l) / R =$$

$$= (1,65 \times 3200 \text{ кг/см}^2 \times 1,7 \text{ см} \times 0,8 \text{ см} \times 90 \text{ см}) / 2,5 \text{ см} \approx 259 \text{ т}$$

и распространённое по площади внешней поверхности загиба S , которое вызвало фактическое напряжение во внешних крайних дислокациях кристаллической решётки $\sigma_\Phi = P_{ПР} / S = P_{ПР} / (\frac{1}{4} 2 \pi r \times l) = 258509 / (0,5 \times 3,14 \times 0,2 \times 90) = 9148 \text{ кг/см}^2$.

7. Превышение предельно допустимых напряжений в погиби $1,07\sigma_T = 1,07 \times 3200 = 3424$ кг/см² составляет $\sigma_{\phi} / 1,07 \sigma_T = 9148$ кг/см² / 3424 кг/см², т.е. примерно в 2,7 раза.

В результате на внешней поверхности загиба наблюдается сплошной разрыв межкристаллических связей от внешней поверхности загиба и на глубину до 2 мм (см. рис. 10), а с учётом утонения детали по линии загиба, за счёт растяжения наружной части и сжатия внутренней, – глубина разрывов межкристаллических связей распространяется на $\approx 30\%$ толщины детали. Кроме того, каждый рабочий цикл прессы происходит практически на пределе его мощности $P_{\text{ПР}}$.



Рис. 10. Результат холодной угловой гибки с дефектами в кристаллической решётке

Пример 2. Согласно описанию решения задачи в технологической инструкции при холодной гибке деталей указанных выше типоразмеров и марки стали следует применять рабочий радиус пуансона с установкой дополнительной технологической насадки с $r \approx (1,5 \div 2,0) s$, т.е. 12 ÷ 16 мм (рис. 11). Ширина и глубина рабочей поверхности пресс-формы (см. рис. 9) определяется, соответственно, как $d_{\text{min}} = 8 s$ или не менее 64 мм, а $h_{\text{min}} \approx (1,5 \div 2,0) R$ или $1,75 \times (r + s) = 38 \div 40$ мм.

Выполнен расчёт необходимой мощности прессы и расчёт количества заготовок (тех же размеров, что и в примере 1), одновременно подаваемых в его рабочую зону. В той же технологической инструкции говорится, что мощность применяемого кромкогибочного прессы $P_{\text{ПР}}$ и средняя длина погиби $l = 900$ мм позволяют выполнить загиб с подачей в его рабочую зону и установкой на пресс-форму только одной заготовки, так как необходимое усилие прессы для её видоизменения составит

$$P_{\text{ПР}} = (1,65 \sigma_T \times r \times s \times l) / R =$$

$$= (1,65 \times 3200 \text{ кг/см}^2 \times 1,4 \text{ см} \times 0,8 \text{ см} \times 90 \text{ см}) / 3,2 \text{ см} = 166320 \text{ кг} \approx 166 \text{ т.}$$

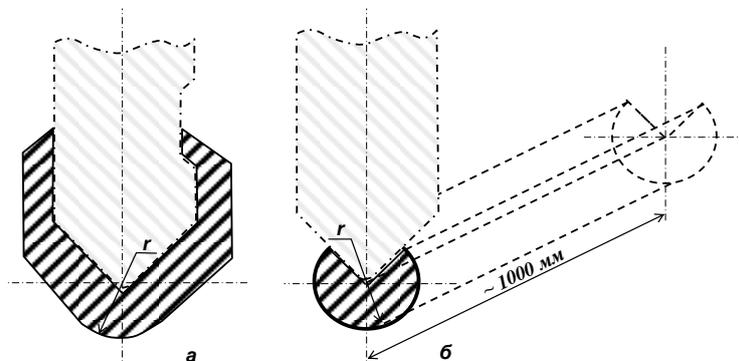


Рис. 11. Формы дополнительных технологических (корончатых) насадок на рабочий инструмент пуансона:

- а – сложной конструкции для толщин стальных заготовок более 8 мм,
- б – простой конструкции для толщин стальных заготовок менее 8 мм

Новизна предложенного подхода: в процессе технологической подготовки он позволяет моделировать параметры прессового оборудования и оснастки для угловой гибки судостроительной стали указанных в табл. 2 марок, которые исключают образование дефектов.

Для проверки сходимости теоретических расчётов и практических результатов в процессе проверки гипотезы, согласно расчётным параметрам, приведённым в табл. 2, выполнено несколько десятков практических холодных загибов на заготовках из сталей: базовой марки нормальной прочности категории *A* в диапазоне толщин от 4 до 6 мм и от 8 до 10 мм и базовой марки повышенной прочности категории *D* с толщинами от 8 до 10 мм. Сходимость результатов в расчётных и фактических (по манометрии) нагрузках пресса ($P_{ПР}$) имела незначительное отклонение и составляла не более чем $\pm 5\%$. Геометрические и структурные характеристики деталей оставались в рамках отклонений, предусмотренных ОСТ 5Р.9091-2002 «Изготовление стальных деталей корпусов металлических судов».

Предварительные расчёты необходимой мощности пресса позволили применить менее энергозатратное оборудование, в нашем случае – с уменьшением мощности на 25%, что само по себе при изготовлении деталей приводит к снижению расходов на эксплуатацию пресса. При этом расчётный выбор технологической оснастки позволил сократить число рабочих циклов кромкогибочного пресса в два раза.

Таблица 2 (фрагмент)

Расчётные параметры R , r , d , h для холодной угловой гибки на 90° базовых марок стали нормальной прочности

Марки стали	σ_T , кг/см ²	δ , %	s , мм	R_{min} , мм	r_{max} , мм	d_{min} , мм	h_{min} , мм
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>A, B, D, E</i>	2400	22	до 4	15	7	15	8
			от 4 до 6	23	11	25	12
			от 6 до 8	30	14	32	16
			от 8 до 10	38	18	45	23
			от 10 до 12	46	22	50	25

Продолжение таблицы 2 (фрагмент)

... марок стали повышенной прочности

Марки стали	σ_T , кг/см ²	δ , %	s , мм	R_{min} , мм	r_{max} , мм	d_{min} , мм	h_{min} , мм
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>A27S, D27S, E27S</i>	2700	22	до 4	15	7	17	10
			от 4 до 6	23	11	25	12

Примечание: 1. Заготовки деталей в некоторых диапазонах толщин листовой стали на указанном предприятии подвергаются только циркульной гибке.

2. Значения R_{min} , r_{max} , d_{min} , h_{min} рассчитаны с ошибкой в безопасную сторону, т.е. $+(10\div 15)\%$ от критической степени деформации в кристаллической решётке.

3. Полная версия табл. 2 опубликована в эл. базе Научной библиотеки ДВФУ в открытом доступе как «РД 5.05.08.04-20».

Выводы

1. Преобразованная формула «котельных напряжений» $P_{ПР} = (1,65 \sigma_T \times r \times s \times l) / R$ представляет практический интерес и новизну подхода при моделировании рабочих усилий пресса в совокупности с соответствующими параметрами технологической оснастки.

2. Для технологической службы корпусного производства завода предложен руководящий документ РД в виде «Методики разработки технологической инструкции на холодную гибку деталей из листовой судостроительной стали категорий *A*, *B*, *D* и *E*». В ней приведены расчётные значения параметров (см. табл. 2) для обеспечения бездефектной холодной угловой

гибки, которые вычислены по приведённой в статье методике, причём исключительно для толщин и марок стали, применяемой на верфи, и для гидропрессового оборудования с технологической оснасткой, которыми располагает корпусное производство предприятия.

3. Предел текучести σ_T , относительное удлинение δ и толщина заготовки s – аргументы в функции определения внешнего радиуса погиби детали R и радиуса рабочего инструмента пуансона r . С учётом изменения положения нейтральной оси в угловом погибе на 90° , в зависимости от σ_T и относительного удлинения δ для различных марок стали минимальный радиус погиби детали R_{\min} и максимальный радиус рабочего инструмента пуансона r_{\max} рассчитаны: для $\delta = 22\%$ – $R_{\min} \geq 3,8s$, $r_{\max} \leq 1,8s$; для $\delta = 21\%$ – $R_{\min} \geq 4,0s$, $r_{\max} \leq 2,0s$; и для $\delta = 20\%$ – $R_{\min} \geq 4,3s$, $r_{\max} \leq 2,3s$.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В.М. Материаловедение. Стандарт третьего поколения. Ч. 1. Материаловедение. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, 2015. 327 с.
2. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. и др. Материаловедение. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 648 с.
3. Арзамасов Б.Н., Соловьева Т.В., Герасимов С.А. Справочник по конструкционным материалам. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 640 с.
4. Богодухов С.И., Проскурин А.Д., Шеин Е.А., Приймак Е.Ю. Материаловедение. Оренбург: ОГУ, 2013. 198 с.
5. Будниченко М.А., Вайнер Л.М., Березанский Л.Е. Разработка и материаловедческое обоснование технологии холодной гибки деталей корпусов кораблей из высокопрочных сталей и сплавов методом локального деформирования // Вопросы материаловедения. 2018. № 4(96). С. 67–77.
6. Горынин И.В. Размышления с оптимизмом. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2014. 526 с.
7. ГОСТ Р 52927-2015. Прокат для судостроения из стали нормальной, повышенной и высокой прочности. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2017.
8. Дорофеев В.И., Кляхин В.Н., Фомичёв А.Б. Физико-математическая модель функционирования судокорпусного цеха как структурного подразделения судостроительного предприятия // Морской вестник. 2017. № 1(61). С. 32–35.
9. Каллистер У.Д., Ретвич Д.Д. Материаловедение. От технологии к применению (металлы, керамика, полимеры). СПб.: Научные основы и технологии, 2011. 896 с.
10. Коротовская С.В., Нестерова Е.В., Хлусова Е.И., Орлова В.В. Влияние параметров пластической деформации на формирование ультрамелкозернистой структуры в низколегированных бейнитовых сталях // Вопросы материаловедения. 2011. № 1. С. 100–109.
11. Латхин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. М.: Эколит, 2011. 528 с.
12. Попов В.И., Куклин О.С. Стандартизация технологических процессов и граничных условий деформирования при изготовлении корпусных деталей из новых сталей и алюминиевых сплавов // Судостроение. 2010. № 6(793). С. 53–56.
13. Фетисов Г.П., Гарифуллин Ф.А. Материаловедение и технология металлов. М.: Оникс, 2009. 624 с.
14. Фью Аунг Чжо, Овчинников И.Д. Особенности изготовления плоских и гнутых деталей корпуса // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы конференции. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский на Амуре гос. техн. ун-т, 2018. С. 78–81.

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2021-1-4>

Vlasov S., Elatontsev N.

SERGEY VLASOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
(Corresponding Author), Polytechnic Institute, vsv-57@mail.ru*Far Eastern Federal University*NIKOLAY ELATONTSEV, Technical Director of *Vostochnaya Verf JSC*, v_verf_to@mail.ru
Vladivostok, Russia**Balance of stresses and deformations during cold bending of sheet-shipbuilding steel**

Abstract: The process of development and implementation by the authors of the guideline document RD 5.05.08.04-20 *Methodology for the development of technological instructions for cold bending of parts from sheet shipbuilding steel* in the hull production of JSC *Vostochnaya Verf* (Vladivostok) is described herein. The paper covers the results of theoretical and practical studies of the processes occurring in the structure of shipbuilding steel of ordinary and high-strength during angular and circular bending of hull parts of offshore structures. Calculation formulas are given to properly assign the operating parameters of hydraulic press equipment and technological equipment. The new approach proposed by the authors in the process of technological preparation of production made it possible to simulate the parameters of pressing equipment and tooling for angular bending, with the use of which formation of any defects is excluded. Preliminary calculations of the required power of the press allow using less energy-consuming equipment with a power reduction of 25%. At the same time, the calculated selection of technological equipment allows to reduce the number of working cycles of the bending press in half.

Keywords: plastic deformation, angular bending, circular bending, press force, mold parameters, punch parameters

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

REFERENCES

1. Aleksandrov V.M. Materials Science. Third generation standard. Part 1. Materials science. Ar-khangel'sk, Northern (Arctic) Federal University, 2015, 327 p.
2. Arzamasov B.N., Makarova V.I., Mukhin G.G. et al. Materials Science. M., Publishing house of MSTU named after N.E. Bauman, 2008, 648 p.
3. Arzamasov B.N., Solovieva T.V., Gerasimov S.A. Handbook of construction materials. M., Publishing house of MSTU named after N.E. Bauman, 2005, 640 p.
4. Bogodukhov S.I., Proskurin A.D., Shein E.A., Priymak E.Yu. Materials Science. Orenburg, OSU, 2013, 198 p.
5. Budnichenko M.A., Weiner L.M., Berezansky L.Ye. Development and material science substantiation of the technology of cold bending of ship hull parts made of high-strength steels and alloys by the method of local deformation. *Materials science issues*. 2018(96):67–77.
6. Gorynin I.V. Reflections with optimism. SPb., Publishing House of the Polytechnic Univ., 2014, 526 p.
7. GOST R 52927-2015 Rolled products for shipbuilding from steel of normal, increased and high strength. Technical conditions. M., Standartinform, 2017.
8. Dorofeev V.I., Klyakhin V.N., Fomichev A.B. Physical and mathematical model of the functioning of a ship hull shop as a structural unit of a shipbuilding enterprise. *Marine Bulletin*. 2017(61):32–35.
9. Callister U.D., Retvich D.D. Materials Science. From technology to application (metals, ceramics, polymers). SPb., Scientific bases and technologies, 2011, 896 p.
10. Korotovskaya S.V., Nesterova E.V., Khlusova E.I., Orlova V.V. Influence of parameters of plastic deformation on the formation of ultrafine-grained structure in low-alloyed bainite steels. *Materials Science Issues*. 2011(1):100–109.
11. Latkhin Yu.M., Leontyeva V.P. Materials Science. M., Ecolit, 2011, 528 p.
12. Popov V.I., Kuklin O.S. Standardization of technological processes and boundary conditions of deformation in the manufacture of body parts from new steels and aluminum alloys. *Shipbuilding*. 2010(793):53–56.
13. Fetisov G.P., Garifullin F.A. Materials science and technology of metals. M., Onyx, 2009, 624 p.
14. Few Aung Zhuo, Ovchinnikov I.D. Features of the manufacture of flat and bent body parts. Scientific and technical creativity of graduate students and students, conference. Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, 2018, p. 78–81.