

УДК 621.771.23.09

## ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ПО ТОЛЩИНЕ

*Максимов А.Б.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры «Машины и аппараты  
пищевых производств» (aleksandrmsk@yandex.ru)*

*Шевченко И.П.<sup>2</sup>, главный метролог*

*Ерохина И.С.<sup>1</sup>, старший преподаватель кафедры «Машины и аппараты  
пищевых производств»*

<sup>1</sup> Керченский государственный морской технологический университет  
(298309, Россия, Республика Крым, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82)

<sup>2</sup> ООО «Судостроительный завод «Залив»  
(298310, Россия, Республика Крым, Керчь, ул. Танкистов, 4)

**Аннотация.** Исследовано влияние одностороннего ускоренного охлаждения толстолистовой судостроительной стали А32 толщиной 10 мм на структуру и механические свойства. Вследствие такого охлаждения по толщине заготовки формируется непрерывный спектр микроструктур от феррито-бейнитной на ускоренно охлажденной поверхности до феррито-перлитной на противоположной. Поэтому по толщине заготовки прочностные свойства уменьшаются от ускоренно охлажденной поверхности к противоположной. Таким образом, градиент прочностных характеристик (твердости, предела текучести и временного сопротивления разрыву) по толщине заготовки направлен к ускоренно охлажденной поверхности. Для сравнительного анализа другие партии заготовок подвергали нормализации и закалке с высоким отпуском. Анализ механических свойств показал, что прочностные и пластические свойства образцов при одностороннем ускоренном охлаждении находятся на уровне свойств образцов при термоупрочненном состоянии. При испытании на ударный изгиб образцов с изменяющимся распределением механических свойств по толщине показано, что работа удара зависит от соотношения направлений градиента прочностных свойств и приложения нагрузки. Показано, что при испытании на ударный изгиб при температуре  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  в случае, если направление приложения нагрузки противоположно градиенту прочностных свойств, работа удара составляла более 300 Дж (образец не разрушился). При совпадении направлений градиента сопротивления деформации и приложения нагрузки работа удара составляла 262 Дж. Таким образом, если направление градиента сопротивления деформации совпадает с направлением действия внешней приложенной нагрузки, то это приводит к повышению пластичности стали. Показано, что, зная распределение прочностных характеристик (предела текучести, временного сопротивления разрыву) по толщине образца, можно рассчитать интегральные значения предела текучести и временного сопротивления разрыва образца. Величина относительного удлинения по толщине увеличивается от ускоренно охлажденной поверхности к противоположной. Интегральное относительное удлинение образца не больше наименьшего значения относительного удлинения по толщине. При изменяющейся прочности по толщине заготовки при изгибе неизбежно смещение нейтральной линии деформации относительно геометрически средней линии в направлении градиента прочностных свойств. Положение нейтральной линии деформации при изгибе предлагается определять по значению экспериментального интегрального предела текучести (временного сопротивления разрыву).

**Ключевые слова:** одностороннее ускоренное охлаждение, термическое армирование, нейтральная линия деформации при изгибе, ударный изгиб, градиент механических свойств, низколегированная сталь.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-8-587-593

### ВВЕДЕНИЕ

Свойства термически армированного листового проката из углеродистых и низколегированных сталей изложены в работах [1 – 3]. Суть термического армирования состоит в том, что нагретый до температуры аустенитизации листовой прокат избирательно ускоренно охлаждают по площади листа симметрично с двух сторон. В результате такой обработки образуются макрообласти с различной микроструктурой. Форма макрообластей может представлять, например, полосы, наклоненные к направлению длины листа на заданный угол. Возможен также локальный нагрев заданных областей металла с последующим ускоренным охлаждением.

Другой разновидностью термического армирования является одностороннее ускоренное охлаждение толстолистового проката, нагретого до температуры аустенитизации [4]. В результате такой термической обработки скорость охлаждения по толщине листа уменьшается от ускоренно охлажденной поверхности к противоположной. Вследствие этого возникает непрерывно изменяющийся набор микроструктур распада аустенита. Поэтому механические свойства меняются по толщине листа: прочностные характеристики и твердость уменьшаются от ускоренно охлажденной поверхности к противоположной, относительное удлинение при этом возрастает.

В работе [4] исследовалось влияние одностороннего ускоренного охлаждения листового проката

толщиной  $14 \cdot 10^{-3}$  м из стали 14Г2 на распределение твердости и изгиб до появления первой трещины на растянутой стороне. Получено, что на ускоренно охлажденной поверхности до глубины  $(2 - 3) \cdot 10^{-3}$  мм твердость составляла 350 – 450 HV, что соответствует твердости 37 – 45 HRC. На противоположной поверхности твердость на глубине  $(4 - 5) \cdot 10^{-3}$  мм составляет 250 – 260 HV (или примерно 26,6 HRC), что позволяет беспрепятственно проводить механическую обработку резанием. Например, для ряда деталей угольного машиностроения требуется удовлетворительная механическая обработка резанием, а другая сторона должна иметь хорошую износостойкость. Применение местных наплавов и усложнение химического состава приводит к удорожанию продукции и ухудшению свариваемости.

Для исследуемой стали 14Г2 углеродный эквивалент составлял 0,47, а для судостроительной стали А32 – 0,42. Значения углеродного эквивалента рассчитывались по формуле [5].

Целью настоящей работы является исследование влияния одностороннего ускоренного охлаждения толстолистового проката судостроительной стали А32 на структуру и механические свойства.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Из листов судостроительной стали А32 толщиной  $10 \cdot 10^{-3}$  м поперек направлению прокатки вырезали заготовки размером  $(350 \times 60 \times 10) \cdot 10^{-3}$  м. Заготовки нагревали в печи до  $950 \text{ }^\circ\text{C}$  со временем выдержки 1,5 мин/мм и подвергали одностороннему ускоренному охлаждению водой в душирующей лабораторной установке. Плотность орошения водой составляла  $17,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Скорость охлаждения металла на поверхности заготовок составляла  $80 - 60 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ .

Для сравнительного анализа одна часть заготовок подвергалась нормализации: нагрев в печи до температуры  $950 \text{ }^\circ\text{C}$  с выдержкой 1,5 мин/мм с последующим охлаждением на воздухе. Другая часть заготовок подвергалась закалке с отпуском: нагрев в печи до температуры  $950 \text{ }^\circ\text{C}$  с выдержкой 1,5 мин/мм и охлаждением путем погружения в воду с последующим отпуском при температуре  $650 \text{ }^\circ\text{C}$  с выдержкой 3 мин/мм.

Из термически обработанных заготовок вырезали образцы для испытания на изгиб по ГОСТ 14019 – 80 «Металлы. Методы испытания на изгиб» до угла изгиба с максимальным усилием. Испытания на растяжение проводили на плоских образцах без головок по ГОСТ 1497 – 84 «Металлы. Испытание на растяжение». Для испытания на ударную вязкость (ГОСТ 9454 – 78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах») поперек заготовки вырезали образцы размером  $(5 \times 10 \times 55) \cdot 10^{-3}$  м без надреза с двумя черными (необработанными) сторонами. Испытания проводили на маятниковом копре с номинальной потенциальной энергией

300 Дж при температуре  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  с регистрацией работы удара (K).

Твердость стали измеряли по ГОСТ 2999 – 75 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу» при нагрузке 20 Н.

Микроструктуру стали исследовали на оптическом микроскопе МИМ-8М с цифровым фотоаппаратом.

Математическую обработку экспериментальных данных проводили с применением программного обеспечения Excel.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При одностороннем ускоренном охлаждении заготовок скорость охлаждения по толщине убывает от ускоренно охлаждаемой поверхности к противоположной. В результате этого по толщине образца образуется набор микроструктур. Исследованиями установлено, что спектр микроструктур по толщине заготовки изменяется от феррито-бейнитной на ускоренно охлаждаемой поверхности до феррито-перлитной на неохлаждаемой. После нормализации формируется феррито-перлитная структура, а после закалки с отпуском – феррито-цементитная.

Вследствие формирования различных микроструктур при одностороннем охлаждении твердость по толщине заготовок будет изменяться. Таким образом по толщине заготовки возникает градиент механических свойств. На рис. 1 представлено изменение твердости

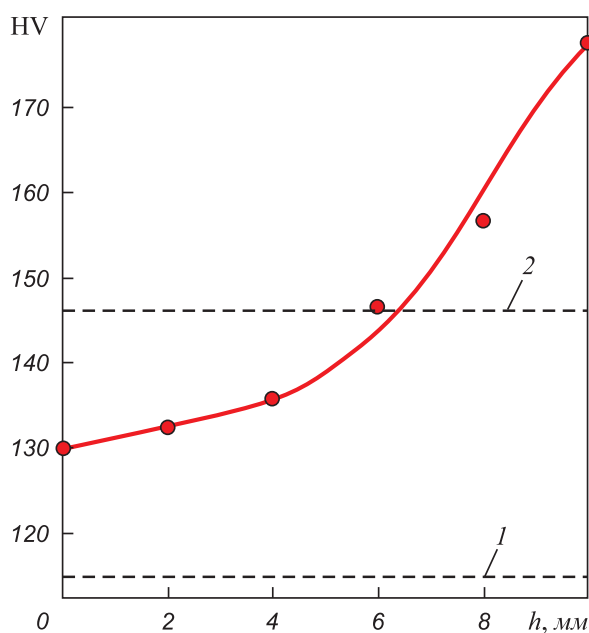


Рис. 1. Изменение твердости по сечению при одностороннем ускоренном охлаждении:

1 и 2 – твердость после нормализации и закалки с отпуском

Fig. 1. Change of hardness over the cross section at one-sided accelerated cooling:

1 and 2 – hardness after normalization and temper hardening, respectively

по толщине заготовки при одностороннем ускоренном охлаждении. Для прочностных характеристик (твердости, предела текучести, временного сопротивления разрыву, сопротивления деформации) градиент направлен в сторону ускоренно охлажденной поверхности.

В таблице представлены механические свойства стали А32 после термической обработки в различных режимах.

При испытании на изгиб и динамический изгиб возникают одинаковые напряженно-деформированные состояния, отличающиеся различной скоростью приложения нагрузки.

При однородной микроструктуре по толщине образца (например, после нормализации или закалки с отпуском) механические свойства одинаковые в любой точке. Поэтому сопротивление деформации  $\sigma_s$  по толщине образца не изменяется и может быть представлено как

$$\sigma_s = C, \quad (1)$$

где  $C$  – постоянная величина.

При пластическом изгибе одна часть металла подвергается растяжению, а другая – сжатию. Для выполнения условия равновесия момент сопротивления сил сжатия будет равен моменту сопротивления сил растяжения [6 – 8]. При однократном пластическом изгибе можно считать, что сопротивление металла растяжению и сжатию практически одинаковое [9], тогда условие равновесия моментов сил будет иметь следующий вид:

$$\sigma_s x_0 = \sigma_s (h - x_0), \quad (2)$$

где  $x_0$  – координата нейтральной линии деформации;  $h$  – толщина образца.

Из выражения (2) следует, что положение нейтральной линии деформации (н.л.д.) совпадает с положением геометрически средней линии (г.с.л.) образца.

Схема пластического изгиба с линейным упрочнением [8] при условии равенства сопротивлений растяжению (индекс «р») и сжатию (индекс «с») представлена на рис. 2. При этом значения деформаций на растянутой ( $\epsilon^p$ ) и сжатой ( $\epsilon^c$ ) сторонах равны по абсолютной величине.

Известно [10 – 12], что между пределом текучести ( $\sigma_T$ ) и твердостью (HV) существует устойчивая корреляционная зависимость линейного вида. По экспериментальным данным для стали марки А32 получаем

$$\sigma_T = 3,22HV. \quad (3)$$

При одностороннем ускоренном охлаждении вследствие различия микроструктур по толщине сопротивление деформации уменьшается от ускоренно охлаждаемой поверхности образца к неохлаждаемой. Величина сопротивления деформации равна пределу текучести [13, 14]:

$$\sigma_s = 3,22HV. \quad (4)$$

В соответствии с условием равновесия момент сил сопротивления сжатой части должен быть равен моменту сил сопротивления растянутой части. Пусть распределение сопротивления деформации изменяется от толщины  $x$  и имеет вид

$$\sigma_s = \sigma_s(x). \quad (5)$$

Тогда условие равенства моментов сил сопротивления растяжению ( $\sigma_s^p$ ) и сжатию ( $\sigma_s^c$ ) запишется так:

$$\int_0^{x_0} \sigma_s^p(x) dx = \int_{x_0}^h \sigma_s^c(x) dx. \quad (6)$$

Величина  $x_0$  представляет координату нейтральной линии деформации при изгибе. Сопротивление деформации изменяется по толщине: от максимального значения на ускоренно охлажденной стороне до минимального на противоположной. Поэтому нейтральная линия деформации сместится от геометрической средней линии на величину  $\Delta$  в сторону, где сопротивление деформации больше. Таким образом, при пластическом изгибе нейтральная линия деформации всегда смещается в направлении градиента прочности, то есть в сторону слоев с большей прочностью.

Рассмотрим смещение нейтральной линии деформации при пластическом изгибе, когда упрочненная область растянута, а неупрочненная – сжата (вариант 1).

### Механические свойства стали А32

#### Mechanical properties of A32 steel

Термообработка	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$K$ , Дж	Максимальная нагрузка при изгибе, Н	Угол изгиба, град
Нормализация	365	466	32,0	258	1250	118
Закалка с отпуском	487	595	21,3	262	1400	112
Одностороннее охлаждение	483	600	21,5	$\geq 300$ 262	$\frac{1450}{1380}$	$\frac{107}{117}$

Примечание. Числитель – сжатие со стороны ускоренного охлаждения (вариант 2); знаменатель – растяжение с неохлажденной стороны (вариант 1).

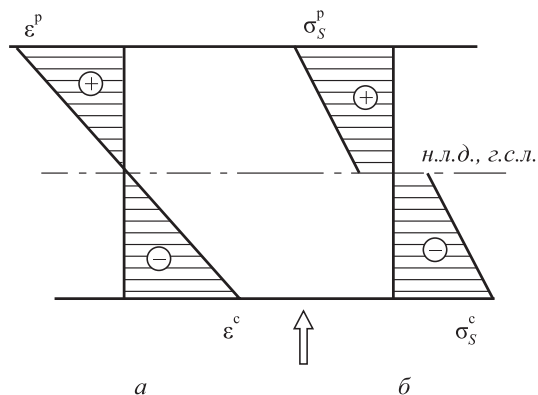


Рис. 2. Эпюры распределения деформации (а) и напряжений (б) при пластическом изгибе бруса с линейным упрочнением. Стрелкой указано направление внешней нагрузки

Fig. 2. Distribution diagrams of strain (a) and stresses (b) at plastic bending of a bar with linear hardening. → – direction of external load

При смещении нейтральной линии деформации на величину  $\Delta$  в сторону растянутых волокон ширина сжатой части составляет  $(h/2 + \Delta)$ , а растянутой –  $(h/2 - \Delta)$ , т.е. по варианту 1 ширина сжатой части больше, чем растянутой.

При изгибе по варианту 2, когда упрочненная сторона сжата, а неупрочненная – растянута, нейтральная линия деформации сместится на величину  $\Delta$  в сторону сжатых волокон. Тогда ширина растянутой части будет  $(h/2 + \Delta)$ , а сжатой –  $(h/2 - \Delta)$ . По варианту 2 ширина растянутой части больше, чем сжатой. Из этого следует, что по варианту 1 область сжатия больше, чем по варианту 2.

Известно [15 – 18], что наличие сжимающих напряжений повышает пластичность металла. Поэтому по варианту 1 сталь находится в более пластичном состоянии, чем по варианту 2 и при меньшем усилии подвергается деформации. Этим объясняется то, что работа удара  $K$  по варианту 2 больше, чем по варианту 1 (см. таблицу).

Аналогичная зависимость наблюдается при испытании на изгиб до максимального усилия.

Уравнение (3) определяет зависимость между твердостью стали и ее пределом текучести. При одностороннем ускоренном охлаждении твердость по толщине заготовки зависит от расстояния от охлаждаемой поверхности (рис. 1), поэтому предел текучести тоже будет изменяться:

$$\sigma_T(x) = 3,22 f_{HV}(x); \quad (7)$$

здесь  $f_{HV}(x)$  – функция изменения твердости по Виккерсу по толщине  $x$  заготовки.

Тогда расчетный интегральный предел текучести ( $\sigma_T^{инт}$ ) образца с изменяющейся прочностью по толщине можно вычислить по выражению

$$\sigma_T^{инт} = \frac{1}{h} \int_0^h \sigma_T(x) dx, \quad (8)$$

или с учетом выражения (7) получим

$$\sigma_T^{инт} = \frac{3,22}{h} \int_0^h f_{HV}(x) dx. \quad (9)$$

Из математического анализа по теореме Ньютона о среднем следует [19]

$$\sigma_T(\xi) = \frac{3,22}{h} \int_0^h f_{HV}(x) dx, \quad (10)$$

где  $\xi$  – величина, находящаяся в интервале  $0 < \xi < h$ ;  $\sigma_T(\xi)$  – расчетное значение предела текучести при  $x = \xi$ , МПа.

Экспериментальную зависимость твердости по толщине образца (рис. 1) с помощью программы Excel можно аппроксимировать линейным полиномом третьей степени:

$$f_{HV}(x) = -0,0313x^3 + 0,75x^2 - 0,6964x + 130,36, \quad (11)$$

где  $f_{HV}(x)$  – экспериментальное значение твердости по толщине образца на расстоянии  $x$  от ускоренно охлаждаемой поверхности.

Коэффициент корреляции уравнения парной регрессии (11) составляет 0,998.

Подставляя уравнение (11) в формулу (7), учитывая, что  $\sigma_S = \sigma_T$ , и используя соотношение (6), после интегрирования получим, что расчетное значение  $x_0 = 6,1 \cdot 10^{-3}$  м. Таким образом, в данном случае смещение нейтральной линии деформации при изгибе составляет  $1,1 \cdot 10^{-3}$  м (11 % от толщины образца). На рис. 3 представлена расчетная эпюра сопротивления деформации по толщине образца при изгибе.

Подставляя в уравнение (10) значение  $\xi = 6,1 \cdot 10^{-3}$  м и в выражение (9), получим, что расчетное интегральное значение предела текучести составляет 485 МПа. Экспериментальное значение предела текучести 483 МПа, то есть различие не превышает 0,7 %. Так как погрешность испытательной разрывной машины составляет

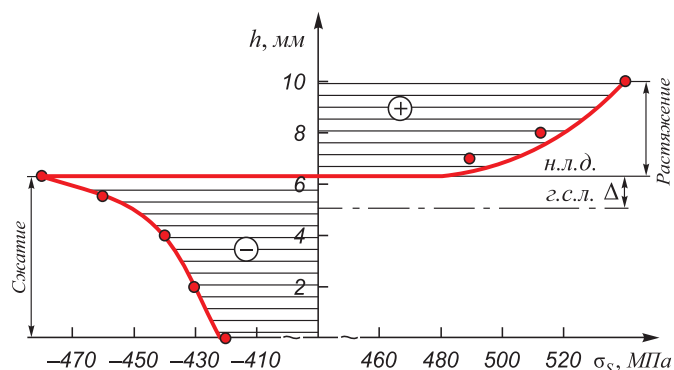


Рис. 3. Эпюра расчетного напряжения сопротивления деформации по толщине при изгибе

Fig. 3. Diagram of estimated strain of deformation resistance over the thickness at bending



1 %, то имеются основания полагать, что экспериментальное и расчетное значения предела текучести удовлетворительно совпадают, поэтому предложенная методика расчета применима на практике. На рис. 4 представлено изменение предела текучести по толщине, рассчитанное по формуле (7). Экспериментальное значение интегрального предела текучести соответствует положению нейтральной линии при изгибе. Аналогичные результаты получены при расчете смещения нейтральной линии деформации и интегрального временного сопротивления разрыву по зависимости временного сопротивления разрыву по толщине образца от расстояния до ускоренно охлаждаемой стороны.

Таким образом, зная экспериментальное интегральное значение предела текучести и распределение предела текучести по толщине образца, можно определить положение нейтральной линии при изгибе, а также наоборот.

В работе [20] показано, что для низколегированных сталей между относительным удлинением и пределом текучести наблюдается линейная зависимость. По экспериментальным данным настоящей работы такая же зависимость наблюдается для стали марки А32:

$$\delta = -0,25\sigma_T + 138. \quad (12)$$

Таким образом, величина относительного удлинения при одностороннем ускоренном охлаждении возрастает к неохлаждаемой поверхности. Зная характер распределения твердости, зависимость между твердостью и пределом текучести, можно рассчитать, как изменится относительное удлинение по толщине. Расчеты показали, что величина относительного удлинения по толщине заготовки от ускоренно охлаждаемой поверхности к неохлаждаемой изменяется от 24 до 33 %. Экспериментальное значение интегрального относительного удлинения образцов при одностороннем ускоренном охлаждении составляет 21,5 %. Отсюда следует, что при градиенте механических свойств по толщине интегральное относительное удлинение образца не превышает минимального значения.

Кроме того, пластичность стали можно оценить по соотношению предела текучести к временному сопротивлению разрыва [21, 22] ( $\sigma_T/\sigma_B$ ). Для стали А32 в нормализованном состоянии это соотношение составляет 0,763; для состояния после закалки с отпуском – 0,813; для одностороннего охлаждения – 0,787. Поэтому при одностороннем охлаждении пластичность не хуже, чем после закалки с отпуском.

При двухстороннем ускоренном охлаждении на обеих сторонах стальной заготовки возникают термические сжимающие и фазовые растягивающие напряжения. Вследствие симметричного охлаждения эти напряжения компенсируют друг друга и плоскостность заготовки практически не изменяется. При одностороннем ускоренном охлаждении на охлаждае-

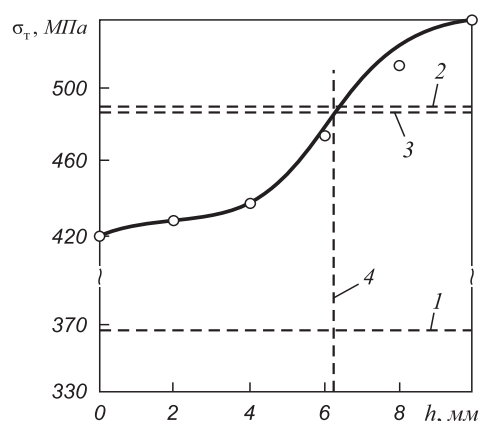


Рис. 4. Изменение расчетного предела текучести по толщине заготовки при одностороннем ускоренном охлаждении: 1 и 2 – значения пределов текучести соответственно после нормализации и закалки с отпуском; 3 – интегральный предел текучести после одностороннего ускоренного охлаждения; 4 – расчетное положение нейтральной линии деформации при изгибе

Fig. 4. Change in yield stress over the billet thickness at one-sided accelerated cooling:

1 and 2 – yield stress values after normalization and quenching with tempering, respectively; 3 – integral yield strength after one-sided accelerated cooling; 4 – calculated position of neutral axis of deformation at bending

мой поверхности возникают термические напряжения сжатия и фазовые – растяжения. Так как в результате одностороннего ускоренного охлаждения образец искривляется выпуклостью к охлаждаемой поверхности, следует, что фазовые напряжения растяжения преобладают над термическими. В пересчете на 1 м длины заготовки неплоскостность составляет 6 – 8 мм, что соответствует категории высокой плоскостности по ГОСТ 19903 – 2015 «Прокат листовой горячекатаный». Повысить категорию плоскостности можно в роликоправильной машине холодной правки.

## Выводы

Установлено, что при пластическом изгибе образцов с градиентом прочностных характеристик по толщине нейтральная линия деформации смещается относительно геометрически средней линии по направлению градиента прочности, то есть в направлении волокон с большей прочностью.

Если направления внешнего усилия при ударном изгибе и градиента прочностных свойств совпадают, то пластичность стали повышается по сравнению с противоположным их направлением. Повышение пластичности стали обусловлено увеличением зоны сжатия при смещении нейтральной линии деформации.

Установлена взаимосвязь между экспериментальным интегральным пределом текучести при растяжении и положением нейтральной линии при пластическом изгибе образцов с градиентом прочности по толщине. Положение нейтральной линии деформации

при изгибе соответствует слою металла со значением предела текучести, равным интегральному значению предела текучести при одноосном растяжении образцов с градиентом прочности по толщине. Аналогичная зависимость справедлива и для интегрального значения временного сопротивления разрыву.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. Украины № 75518. Способ упрочнения листового проката / Максимов А.Б. Оpubл. 17.04.2006. Бюл. № 4.
2. Maximov A.B., Gadeyev A.V. Thermally reinforced steel flat product // International Robotics & Automation Journal. 2018. Vol. 5. No. 4. P. 343 – 345.
3. Максимов А.Б. Особенности разрушения неоднородного материала // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. 2012. № 2. С. 130, 131.
4. Максимов А.Б., Гуляев М.В. Поверхностное упрочнение сталей для изделий шахтного оборудования // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 370 – 375.
5. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
6. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. Учебник для вузов. – М.: МГТУ, 2000. – 592 с.
7. Danchenko V.N. Metal forming. – Dnepropetrovsk: NMetAU, 2007. – 183 p.
8. Gasko M., Rosenberg G. Correlation between hardness and tensile properties in ultra – high strength dual phase steel – short communication // Materials Engineering. 2011. No. 18. P. 155 – 159.
9. Nobuhito Fujeta, Kazukisa Kusumi, Tochmasa Tomokijo. Present Situation and Future Trend of Ultra – High Strength Steel Sheets of Auto – Body // Nippon Steel technical reports. 2013. No. 103. P. 99 – 103.
10. Douthwaite R.M. Relationship between the hardness, flow stress, and grain size of metals // Journal of the Iron and Steel Institute. March, 1970. P. 265 – 269.
11. Farrell K., Loh B.T.L. Hardness-Flow Stress-Grain-size relationships in iron // Journal of the Iron and Steel Institute. November, 1971. P. 915 – 917.
12. Чукин М.В., Полецков П.П., Гущина М.С., Бережная Г.А. Определение механических свойств высокопрочностных и сверхпрочностных сталей по твердости // Производство проката. 2016. № 12. С. 37 – 42.
13. Фридман А.В. Механические свойства металлов. Ч. 1. Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1972. – 472 с.
14. Atsushi Monden, Kei Miyanishi, Shingo Yamasaki Tatsuro Ochi / Development of Middle – carbon Steel Bars and Wire Rods for Cold Forging // Nippon Steel Technical Reports. 2013. No. 103. P. 127 – 132.
15. Liu D.L., Huo X.D., Wang Y.L. and Sun X.W. Aspects of microstructure in low carbon steels produced by the CSP process // J. Univ. Sci. Technol. B. 2003. Vol. 4. No. 10. P. 1 – 6.
16. Потапова Л.Б. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. Как прогнозируют предельные напряжения. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 244 с.
17. Финкель В.М. Физические основы торможения разрушения. – М.: Металлургия, 1977. – 60 с.
18. Нотт Дж.Ф. Основы механики разрушения. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
19. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 2. – СПб.: Лань, 2018. – 612 с.
20. Wang Su-Fen, Peng-Yan, Li Zhi-Jie. Work – Hardening and Deformation Mechanism of Cold Rolled Low carbon Steel // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2013. Vol. 3. No. 5. P. 823 – 828.
21. ASM Handbook, Vol. 1: Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys. ASM Handbook Committee. P. 673 – 688.
22. Васильев Г.Г., Елагина Т.В. О целесообразности учета величины отношения предела текучести к временному сопротивлению при выборе труб для строительства в сложных условиях // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. 2013. № 5 (39). С. 34 – 38.

Поступила в редакцию 21 марта 2018 г.

После доработки 25 января 2019 г.

Принята к публикации 28 января 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. No. 8, pp. 587–593.

## SHEET METAL WITH VARIABLE MECHANICAL PROPERTIES OVER ITS THICKNESS

A.B. Maksimov<sup>1</sup>, I.P. Shevchenko<sup>2</sup>, I.S. Erokhina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kerch State Marine Technical University, Kerch, Crimea, Russia

<sup>2</sup> JSC “Shipbuilding plant “Zaliv”, Kerch, Crimea, Russia

**Abstract.** The influence of one-sided accelerated cooling of A32 plate shipbuilding steel with thickness of  $10 \cdot 10^{-3}$  m on structure and mechanical properties was investigated. As a result of such cooling, continuous spectrum of microstructures from ferrite-bainite on the rapidly cooled surface to ferrite-perlite on the opposite surface is formed along the billet thickness. Therefore, over the billet thickness strength properties are reduced from rapidly cooled surface to the opposite one. Thus, the gradient of strength characteristics (hardness, yield strength and rupture strength) along the billet thickness is directed to rapidly cooled surface. For comparative analysis, other batches of billets were subjected to normalization and hardening with high tempering. The analysis of mechanical properties has shown that strength and plastic properties of the samples at unilateral accelerated cooling are at level of heat-strengthened state. Testing on impact strength of the samples with variable distribution of mechanical properties over their thickness has shown that the impact depends on correlation of gradient directions of strength properties and load application. In impact bending

test at the temperature of  $-40$  °C, if the direction of load application is opposite to gradient of strength properties, the impact work was more than 300 J (the sample did not collapse). At coincidence of directions of the gradient deformation resistance and load, energy of the blow was 262 J. Thus, if the direction of deformation resistance gradient coincides with the direction of external applied load, then it leads to an increase in plasticity of steel. It is shown that, knowing distribution of strength characteristics over the sample thickness, it is possible to calculate integral values of yield strength and rupture strength of the sample. Value of relative through-thickness elongation increases from the rapidly cooled surface to the opposite one. Integral elongation of the billet is less than the smallest relative through-thickness elongation. With changing thickness strength of the billet during bending, displacement of the neutral deformation line relative to the geometrically average line in the direction of the strength properties gradient is inevitable. The position of neutral line of deformation during bending is proposed to be determined by the value of experimental integral yield strength (rupture strength).

**Keywords:** one-sided accelerated cooling, thermal reinforcement, neutral line of bending deformation, impact bending, gradient of mechanical properties, low-alloy steel.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-8-587-593

## REFERENCES

1. Maksimov A.B. *Sposob uprochneniya listovogo prokata* [The method of sheet metal hardening]. Patent Ua no. 75518. *Byulleten' izobretenii*. 2006, no. 4. (In Russ.).
2. Maximov A.B., Gadeyev A.V. Thermally reinforced steel flat product. *International Robotics & Automation Journal*. 2018, vol. 5, no. 4, pp. 343–345.
3. Maksimov A.B. Features of heterogeneous material destruction. *Novye materialy i tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii*. 2012, no. 2, pp. 130–131. (In Russ.).
4. Maksimov A.B., Gulyaev M.V. Surface hardening of steels for mining equipment. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii*. 2015, no. 2, pp. 370–375. (In Russ.).
5. Gol'dshtein M.I., Grachev S.V., Veksler Yu.G. *Spetsial'nye stali* [Special steels]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 408 p. (In Russ.).
6. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov. Uchebnik dlya vuzov* [Strength of materials. Textbook for universities]. Moscow: MGTU, 2000, 592 p. (In Russ.).
7. Danchenko V.N. *Metal forming*. Dnepropetrovsk: NMetAU, 2007, 183 p.
8. Gasko M., Rosenberg G. Correlation between hardness and tensile properties in ultra – high strength dual phase steel – short communication. *Materials Engineering*. 2011, no. 18, pp. 155–159.
9. Nobuhito Fujeta, Kazukisa Kusumi, Tochmasa Tomokijo. Present situation and future trend of ultra – high strength steel sheets of auto – body. *Nippon Steel technical reports*. 2013, no. 103, pp. 99–103.
10. Douthwaite R.M. Relationship between the hardness, flow stress, and grain size of metals. *Journal of the Iron and Steel Institute*. March, 1970, pp. 265–269.
11. Farrell K., Loh B.T.L. Hardness-flow stress-grain-size relationships in iron. *Journal of the Iron and Steel Institute*. November, 1971, pp. 915–917.
12. Chukin M.V., Poletskov P.P., Gushchina M.S., Berezhnaya G.A. Determination of mechanical properties of high-strength and super-strength steels by hardness. *Proizvodstvo prokata*. 2016, no. 12, pp. 37–42. (In Russ.).
13. Fridman A.V. *Mekhanicheskie svoistva metallov. Ch. 1: Deformatsiya i razrushenie* [Mechanical properties of metals. Part 1. Deformation and destruction]. Moscow: Mashinostroenie, 1972, 472 p. (In Russ.).
14. Atsushi Monden, Kei Miyanishi, Shingo Yamasaki Tatsuro Ochi. Development of middle – carbon steel bars and wire rods for cold forging. *Nippon Steel Technical Reports*. 2013, no. 103, pp. 127–132.
15. Liu D.L., Huo X.D., Wang Y.L., Sun X.W. Aspects of microstructure in low carbon steels produced by the CSP process. *J. Univ. Sci. Technol. B*. 2003, vol. 4, no. 10, pp. 1–6.
16. Potapova L.B. *Mekhanika materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii. Kak prognoziryut predel'nye napryazheniya* [Mechanics of materials in complex stress state. How to predict limit stresses]. Moscow: Mashinostroenie-1, 2005, 244 p. (In Russ.).
17. Finkel' V.M. *Fizicheskie osnovy tormozheniya razrusheniya* [Physical basis of the destruction braking]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 60 p. (In Russ.).
18. Knott J.F. *Fundamentals of fracture mechanics*. London: Butterworths, 1973. (Russ.ed.: Knott J.F. *Osnovy mekhaniki razrusheniya*. Moscow: Metallurgiya, 1978, 256 p.).
19. Fikhtengol'ts G.M. *Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya. T. 2* [Course of differential and integral calculus. Vol. 2]. St. Petersburg: Lan', 2018, 612 p. (In Russ.).
20. Wang Su-Fen, Peng-Yan, Li Zhi-Jie. Work – hardening and deformation mechanism of cold rolled low carbon steel. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2013, vol. 3, no. 5, pp. 823–828.
21. *ASM Handbook. Vol. 1: Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys*. ASM Handbook Committee, pp. 673–688.
22. Vasil'ev G.G., Elagina T.V. On feasibility of considering ratio of yield strength to temporal resistance when choosing pipes for construction in difficult conditions. *Truboprovodnyi transport. Teoriya i praktika*. 2013, no. 5 (39), pp. 34–38. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**A.B. Maksimov**, Cand. Sci. (Eng), Assist. Professor of the Chair “Machines and Devices of Food Production”

(aleksandrmsk@yandex.ru)

**I.P. Shevchenko**, Chief Metrologist

**I.S. Erohina**, Senior Lecturer of the Chair “Machines and Devices of Food Production”

Received March 21, 2018

Revised January 25, 2019

Accepted January 28, 2019