

УДК 621.771.

Руденко Е. А.
Курдюкова Л. А.
Бойчук О. А.

ОЦЕНКА СПОСОБОВ ПРОКАТКИ ЛИСТОВ С ПЕРЕМЕННЫМ ПРОДОЛЬНЫМ ПРОФИЛЕМ

Для уменьшения массы конструкций различного назначения и снижения затрат на монтажные работы в восьмидесятых годах прошлого века на зарубежных толстолистовых станах начато устойчивое производство листов, профилированных по длине таким образом, чтобы их толщина оптимально соответствовала профилю нагрузки на конструкцию. По зарубежным оценкам, применение листов с изменяющейся толщиной по их длине позволяет снизить массу судового корпуса на 15–20 % и на 10–12 % снижает расходы на сооружение мостов [1].

К настоящему времени производство листов с переменным продольным профилем (клиновидных) освоено на ТЛС «Kawasaki Steel», «Синниппонсейтецу», «Диллингерхютте», «Витковице» [1–5]. Некоторые типоразмеры клиновидных листов, производимых на ТЛС 5000 «Kawasaki Steel» для судовых переборок и мостостроения показаны на рис. 1 А и Г и рис. 1 Б–Е соответственно [2].

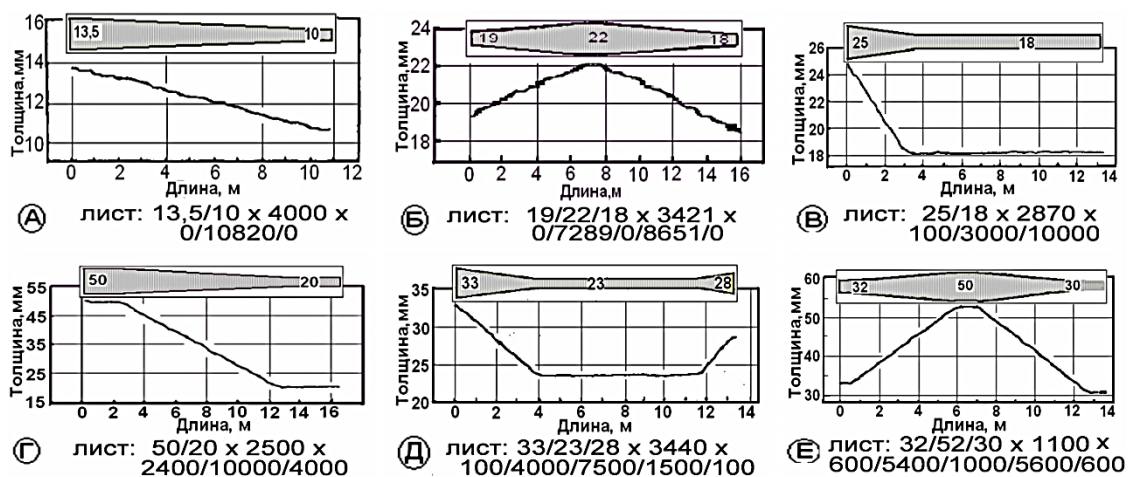


Рис. 1. Изменение толщины по длине листа и схема его продольного профиля:

А, Г – лист для судовой переборки; Б–Е – профили листов для элементов полок мостовых балок

Достигнутая разница толщины по длине листа – 35 мм. Максимально достигнутое изменение толщины на единицу длины листа составляло 5 мм/пог.м. для листов толщиной более 20 мм. Для более тонких листов эта разница не превышает минимальную толщину листа. Информации о способе и технологии получения клиновидного профиля нет.

Целью данной работы является оценка возможных способов получения клиновидных профилей и выбор рационального способа получения клиновидного профиля.

Рассмотрим способы получения клиновидного листа длиной 7 м с переменной толщиной 55–20 мм из стали 09Г2ФБ. При моделировании начальная температура металла по длине раската принята постоянной. Температура металла между двумя проходами отличается на 10 °С. Температура конца прокатки для всех способов получения клиновидного профиля принята равной 960 °С. Допустимая сила прокатки принята 4500 т. Клиновидную прокатку для способов 1–3 выполняли за 3 прохода, для способов 4, 5 за 5 проходов. Отличительные характеристики каждого из способов приведены в табл. 1. Способы, прежде всего, отличаются друг от друга толщиной раската, с которой начинают клиновидную прокатку.

Так для способов 1–3 – это максимальная толщина клина, а для способов 4, 5 – расчетная величина, зависящая от величины дополнительного обжатия толстого конца клина. Графическая интерпретация данных способов показана на рис. 2.

Таблица 1

Характерные признаки способов получения клиновидного раската

| Признак способа | Способ | | | | |
|---|--------|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Толщина раската для клиновидной прокатки равна максимальной толщине клина | + | + | + | - | - |
| Величина абсолютного обжатия изменяется по линейному закону | + | - | - | + | - |
| Переменное обжатие во всех проходах осуществляется на всей длине раската | + | + | - | + | + |
| Образующая боковой поверхности раската после последнего прохода – клин | - | + | + | - | + |

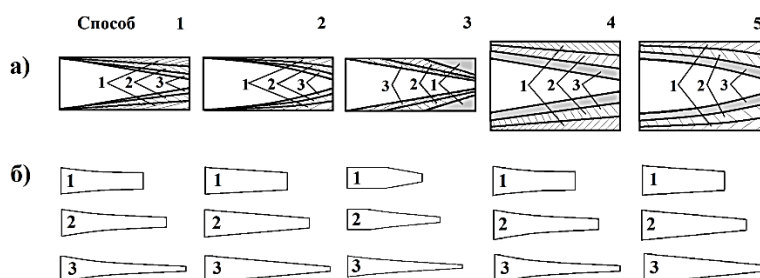


Рис. 2. Способы получения клиновидного профиля:

- а) 1, 2, 3 – смещенный объем после первого, второго и третьего прохода соответственно;
- б) 1, 2, 3 – форма боковой грани после 1-го, 2-го и 3-го прохода соответственно

Оптимальный способ прокатки клиновидного профиля будем определять, исходя из формы получаемого клина, силы прокатки, величины скорости и режима работы нажимного винта.

Рассмотрим первый способ получения клиновидного профиля. В данном способе переменное абсолютное обжатие по длине листа изменяется по линейному закону. Т. к. обжатие в каждом текущем сечении увеличивается, то и вытяжка в каждом сечении увеличивается. Это значит, что все точки по длине листа удаляются друг от друга на расстояние, зависящее от величины вытяжки, т. е. от величины обжатия. А так как обжатие в каждом сечении разное, то и точки удаляются на разное расстояние. Определим, как движутся точка, при такой схеме обжатия. Выделим на листе i участков с одинаковой длиной L/i (рис. 3). На клиновидном профиле данные участки так же расположатся в той же последовательности.

Предположим, что форма каждого участка на клиновидном профиле будет равнобедренной трапецией. Тогда, исходя из условия постоянства объема на этих участках, можно записать:

$$l_1 = \frac{2HL/a}{H + h_1},$$

где $h_1 = 2h_i - H$;

h_i – расчетная точка по верхней поверхности клиновидного профиля от оси x (см рис. 2);
 a – количество расчетных участков i :

$$h_{li} = h_{li-1} - \frac{H-h}{a} = H - \frac{H-h-\Delta h/2}{a};$$

$$h_1 = 2H - 2 \frac{H-h-\Delta h/2}{a} - H = H - 2 \frac{H-h-\Delta h/2}{a};$$

$$l_1 = \frac{2HL/a}{H + H - 2 \frac{H-h-\Delta h/2}{a}} = \frac{HL/a}{H - \frac{H-h-\Delta h/2}{a}}.$$

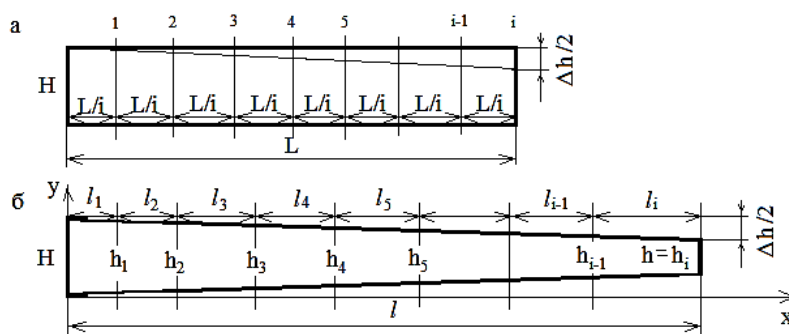


Рис. 3. Схема для расчета положения точек на клиновидном листе для 1-го способа

Аналогичные операции выполняем для 2-го участка:

$$l_2 = \frac{2HL/a}{h_1 + h_2}, \text{ где } h_2 = 2h_{2i} - H;$$

$$h_2 = 2H - 4 \frac{H - h - \Delta h/2}{a} - H = H - 4 \frac{H - h - \Delta h/2}{a};$$

$$l_1 = \frac{2HL/a}{H - 2 \frac{H - h - \Delta h/2}{a} + H - 4 \frac{H - h - \Delta h/2}{a}} = \frac{HL/a}{H - 3 \frac{H - h - \Delta h/2}{a}}.$$

Таким образом, для *i*-го участка можно записать:

$$h_i = H - 2i \frac{H - h - \Delta h/2}{a}; \quad l_i = \frac{HL/a}{H - (2i - 1)(H - h - \Delta h/2)/a}.$$

Определим полную длину листа:

$$l = \sum_{i=1 \dots a} \frac{HL/a}{H - (2i - 1) \frac{H - h - \Delta h/2}{a}}.$$

Упростим полученное выражение:

$$l = \sum_{i=1 \dots a} \frac{HL/a}{H - (2i - 1) \frac{H - h - \Delta h/2}{a}} = HL \sum_{i=1 \dots a} \frac{1}{aH - (2i - 1)(H - h - \Delta h/2)} =$$

$$= HL \int_0^a \frac{di}{aH - (2i - 1)(H - h - \Delta h/2)} = \frac{HL}{-2(H - h - \Delta h/2)} \operatorname{Ln} \left(\frac{Ha - 2Ha + H + 2ha - h - \Delta h/2 + a\Delta h}{Ha + H - h - \Delta h/2} \right).$$

Пусть $a \rightarrow \infty$, тогда длину клиновидного листа определяем по формуле:

$$l = \frac{HL}{-2(H - h - \Delta h/2)} \operatorname{Ln} \left(\frac{2h + \Delta h - H}{H} \right) = \frac{HL}{(H - h)} \operatorname{Ln} \left(\frac{H}{h} \right),$$

а положение каждой точки на раскате определяется формулой:

$$l_i = \frac{HL}{(i - h_i)} \operatorname{Ln} \left(\frac{H}{h_i} \right). \tag{1}$$

На рис. 4, а показана величина вогнутости боковой образующей клиновидного раската после третьего прохода, максимальная величина которой составляет – 1,54 мм. На рис. 4, б, в, г показаны сила прокатки, величина изменения и скорость межвалкового зазора соответственно.

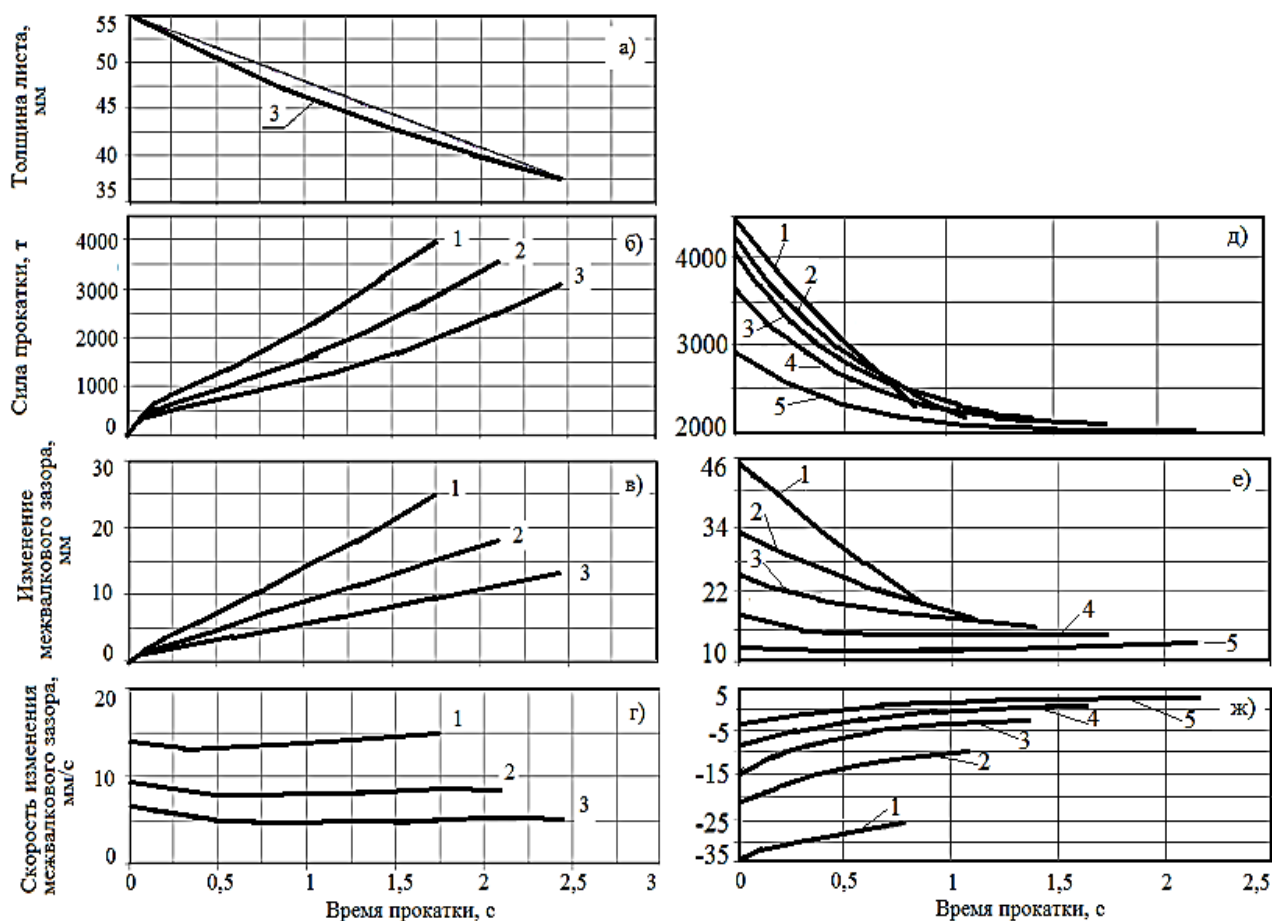


Рис. 4. Величина вогнутости клиновидного раската (а), сила прокатки (б), изменение величины (в) и скорость (г) межвалкового зазора по 1-му способу и сила прокатки (д), изменение величины (е) и скорости (ж) межвалкового зазора по 5-му способу:

1, 2, 3, 4, 5 – первый, 2-ой, 3-й, 4-й и 5-й проход соответственно

Сравнительная характеристика данного способа с остальными показана в табл. 2.

Таблица 2

Результаты моделирования процесса прокатки клиновидного раската

| Способ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Количество проходов | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 |
| Величина вогнутости боковой образующей раската, мм | -1,54 | 0 | 0 | -2,18 | 0 |
| Величина относительной деформации, % | 0-31 | 0-34 | 0-33 | 14-32 | 14-31 |
| Диапазон сила прокатки, т | 0-4100 | 0-4400 | 0-4300 | 1800-4500 | 2000-4500 |
| Величина изменения межвалкового зазора (диапазон), мм | 0-25,1 | 0-27,9 | 0-26,6 | 12,0-44,3 | 11,3-45,5 |
| Диапазон скорости изменения межвалкового зазора, мм/с | 4,8-15,0 | 1,7-14,9 | 0-51,2 | 0,0-30,0 | 0-33,6 |
| Изменение режима работы НВ (подъем/опускание) в 1-ом проходе | нет | нет | да | да | да |
| Характер изменения кривой скорости НВ | простой* | простой | сложный** | простой | простой |

* – кривую скорости НВ можно аппроксимировать линейной или квадратичной функцией;
 ** – кривую скорости НВ описать линейной или квадратичной функцией нельзя.

В способе 2 клиновидную форму получаем за счет неравномерного распределенного абсолютного обжатия по длине листа такого, что при любом h_i , изменяющемся от H до h данное сечение будет расположено на расстоянии от конца листа с толщиной h равным:

$$L_i = \frac{h_i - h}{2 \tan[(H - h)/(2L_0)]}, \quad (2)$$

где L_0 – длина раската с клиновидностью. Соотношение получено из условия постоянства объема металла. Результаты моделирования способа приведены в табл. 2.

Способ 3 повторяет способ прокатки клиновидного листа, применяемый при производстве цветного клиновидного холоднокатаного листа [6]. Листы получают за несколько проходов с промежуточным отжигом при необходимости. Для удобства работы и получения большей производительности стана всю партию листов прокатывают при одной и той же установке валков, затем их передают на другую сторону стана и валки устанавливают на следующий проход. Обжатия выполняют на части раската, увеличивая длину клиновидного раската от прохода к проходу. Результаты моделирования приведены в табл. 2.

Способ 4 представляет собой сочетание способа 1 с дополнительным обжатием в каждом проходе. Дополнительное обжатие приняли равным 14 %. Максимальная величина вогнутости образующей боковой поверхности составила 2,18 мм. Результаты моделирования приведены в табл. 2.

Способ 5 сочетает в себе способ 2 и дополнительное обжатие 14 %. Результаты моделирования приведены в табл. 2 и на рис. 4.

Анализ табл. 2 показывает, что способы 1 и 4 приводят к получению раската с вогнутой боковой образующей. Способ 3 имеет сложную характеристику работы нажимного винта. В способах 1–3 присутствует относительное обжатие менее 5 %. Поэтому рациональным способом получения клиновидного листа является способ 5.

ВЫВОДЫ

Результаты моделирования процесса клиновидной прокатки показали, что из пяти рассмотренных схем получения клиновидного листа, требованиям по форме, относительному обжатию, нагрузкам на стан, работе нажимного устройства удовлетворяет способ совмещения неравномерного обжатия по длине, необходимого для получения ровного клина, и дополнительного обжатия в каждом проходе с переменным обжатием.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коновалов Ю. В. *Справочник прокатчика. Справочное издание в 2-х книгах. Книга 1. Производство горячекатаных листов и полос* / Ю. В. Коновалов. – М. : Теплотехник, 2008. – С. 182–183.
2. Yuge Y. *Производство и применение клиновидных листов LP* / Y. Yuge, T. Hori, S. Nishida // *Новости черной металлургии зарубежом.* – 1999. – № 1. – С. 61–64.
3. Хубо Р. *Использование толстого листа для изготовления экономичных стальных конструкций и сооружений прибрежной зоны* / Р. Хубо, Ф. Мартин, Ф. Шретер // *Черные металлы.* – 2001. – № 4. – С. 45–50.
4. *Steel products for Shipbuilding* / S. Suzuki, R. Muraoka, T. Obinata et all // *Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом.* – 2004. – № 3. – С. 57–60.
5. Артамонова Е. А. *Производство толстых листов высокого качества : Обзорная информация* / Е. А. Артамонова. – М. : Черметинформация, 1987. – № 3. – 24 с. – (Серия «Прокатное производство»).
6. Колпаишников А. И. *Прокатки листов из легких сплавов* / А. И. Колпаишников. – М. : Металлургия, 1979. – 264 с.

Руденко Е. А. – д-р техн. наук, проф. ДонНТУ;

Курдюкова Л. А. – аспирант ДонНТУ;

Бойчук О. А. – студент ДонНТУ.

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

E-mail: zabiralina@ukr.net

Статья поступила в редакцию 18.03.2013 г.