

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РЕДУЦИРОВАНИЯ ЗА СЧЕТ УМЕНЬШЕНИЯ ДЛИНЫ УТОЛЩЕННЫХ КОНЦОВ И КОНЦЕВОЙ ОБРЕЗИ ТРУБ

Гуляев Ю. Г. /д. т. н./, Шифрин Е. И. /к. т. н./

ГП "Научно-исследовательский технологический институт трубной промышленности им. Я. Е. Осады"

У статті наведено матеріали, які висвітлюють результати досліджень щодо удосконалення методик розрахунку норм кінцевої обрізи на редукованих з натягом трубах. Наведено порівняльні розрахунки щодо визначення довжини кінцевої обрізи відповідно методик різних авторів. Показано, що відомі методики для розрахунку довжини кінцевої обрізи не можуть бути використані без відповідної адаптації для використання в умовах звісного стану.

На базі відомої методики розроблено нову математичну модель для розрахунку довжини кінцевої обрізи. Модель адаптовано для використання в умовах ТПА 30-102. Модель здатна диференційовано прогнозувати довжину передньої та задньої кінцевої обрізи в залежності від умов прокатки труб в редуційному стані. Зіставлення розрахункових та регламентованих значень довжини кінцевої обрізи показало високий ступень адекватності розробленої моделі реальному процесу.

Також наведено обґрунтування необхідних змін в норми кінцевої обрізи, що регламентовані на ТПА 30-102. Такі зміни дозволять знизити витратний коефіцієнт металу в умовах ТПА 30-102.

Ключові слова: труби, поздовжня прокатка, редукування, безоправочна прокатка, режими деформації, довжина кінцевої обрізи на трубах.

The article contains materials that illuminate the results of studies on improving the methods for calculating the norms of end crops on reduced pipes. Comparative calculations are made to determine the length of the end crops in accordance to the methods of different authors. It is shown that the known techniques for calculating the length of the end crops can not be used without appropriate adaptation for use in the conditions of a particular mill.

Based on the known technique, a new mathematical model has been developed for calculating the length of the end crops. The model is adapted for use on TPA 30-102 conditions. The model is able to differentially predict the length of the front and rear end crops depending on the pipe rolling conditions in the reduction mill. Comparison of the calculated and regulated values of the length of the end crops showed a high degree of adequacy of the developed model to the real process.

Also it is specified the substantiation of the necessary changes in the norms of the end crops regulated on the TPA 30-102. Such changes will make it possible to decrease the consumption coefficient of metal in conditions of TPA 30-102.

Key words: pipes, lengthwise rolling, reduction, plugless rolling, deformation modes, length of the end crops

В статье приведены материалы, которые освещают результаты исследований по усовершенствованию методик расчета норм концевой обрести на редуцированных трубах. Приведены сравнительные расчеты по определению длины концевой обрести в соответствии с методиками разных авторов. Показано, что известные методики для расчета длины концевой обрести не могут быть использованы без соответствующей адаптации для использования в условиях конкретного стана.

На базе известной методики разработана новая математическая модель для расчета длины концевой обрести. Модель адаптирована для использования в условиях ТПА 30-102. Модель способна дифференцированно прогнозировать длину передней и задней концевой обрести в зависимости от условий прокатки труб в редуциционном стане. Сопоставление расчетных и регламентированных значений длины концевой обрести показало высокую степень адекватности разработанной модели реальному процессу.

Также приведено обоснование необходимых изменений в нормы концевой обрести, которые регламентированы на ТПА 30-102. Такие изменения позволят уменьшить расходный коэффициент металла в условиях ТПА 30-102.

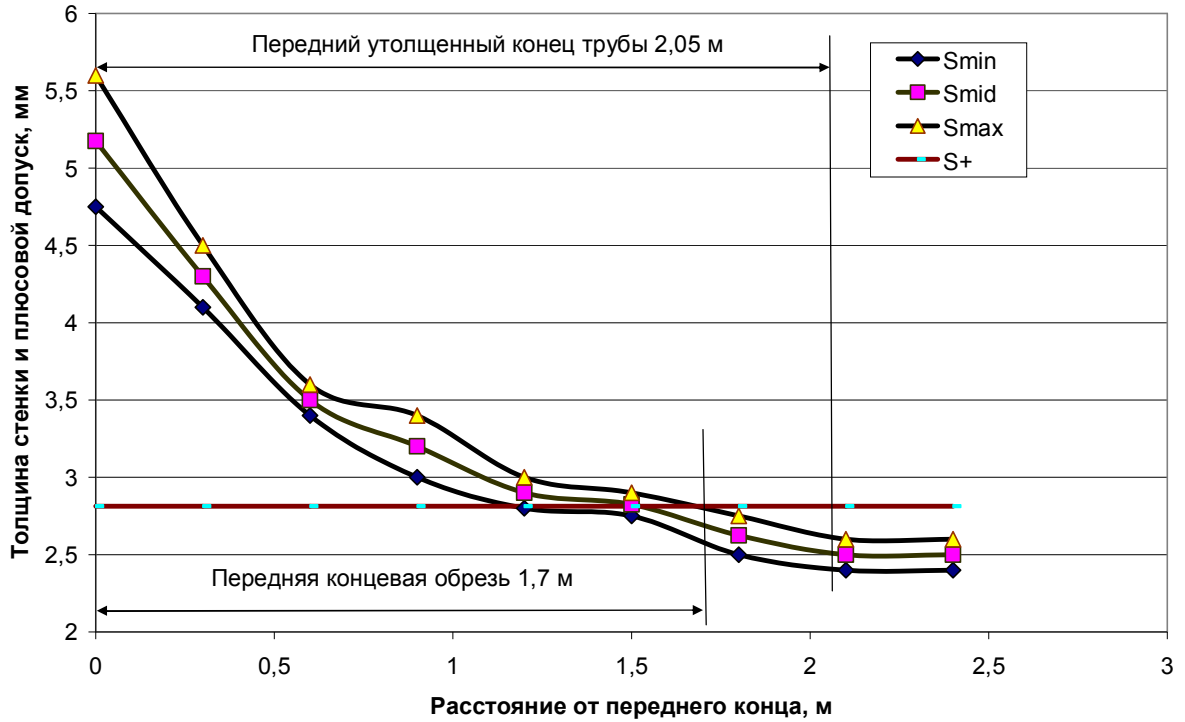
Ключевые слова: трубы, продольная прокатка, редуцирование, безоправочная прокатка, режимы деформации, длина концевой обрести на трубах.

Характерной особенностью процесса редуцирования труб с натяжением является образование утолщенных концов. Связано это явление с тем, что передний и задний концы подвергаются формоизменению в условиях, отличных от условий деформации средней части трубы (а именно, – при отсутствии усилий натяжения, приложенных к переднему, либо заднему концам трубы).

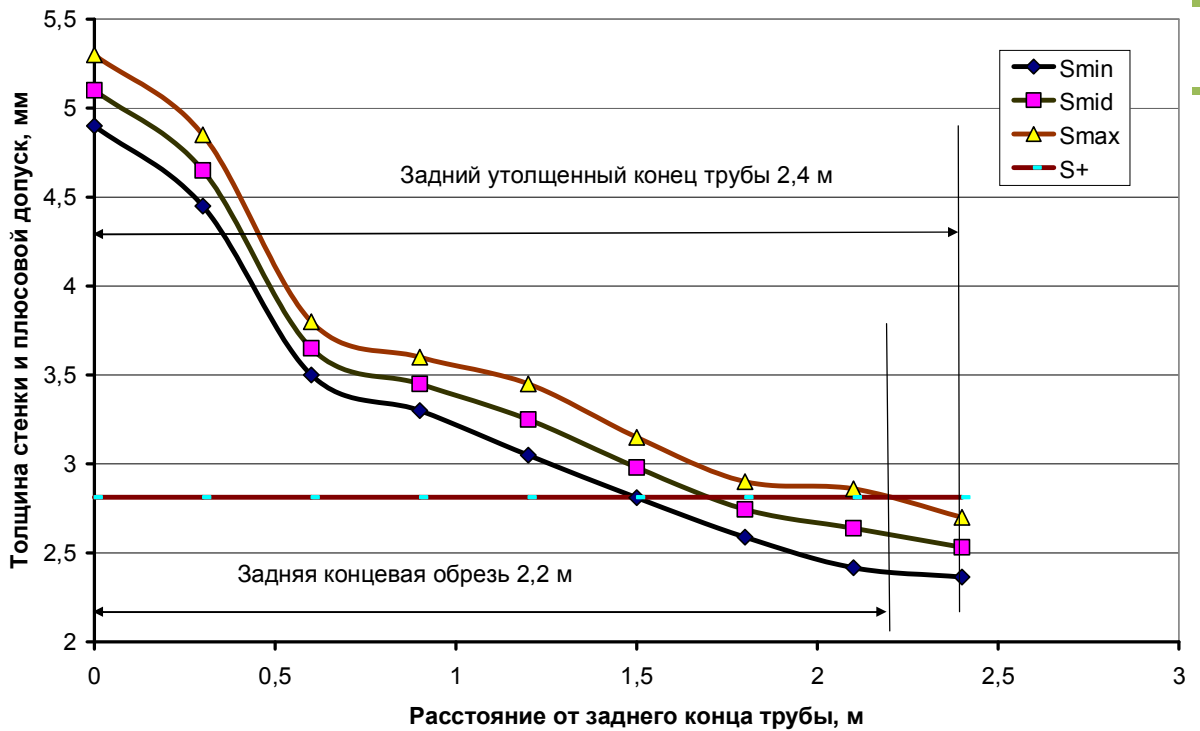
Характер изменения толщины стенки на концах трубы определяет длину и массу концевой обрести, что, в значительной мере определяет экономические показатели всего трубопрокатного агрегата (ТПА) в целом. Проблема утолщенных концов особо остро стоит на ТПА, производящих относительно короткие трубы, т.к. в этом случае длина концевой обрести составляет существенную часть от объема произведенной продукции.

Сказанное иллюстрируется данными, приведенными на рис. 1. Анализ данных, приведенных на рис. 1, показывает, что длина утолщенных концов и концевой обрести на передних и задних концах труб различна. Как правило, длина утолщенных концов и концевой обрести на заднем конце труб превышает эти величины на переднем конце труб.

Анализ известных литературных данных [1-4] показывает, что величина утолщения стенки на концах трубы и длина утолщенных концов в основном зависят от трех параметров прокатки: величины вытяжки μ , межклетевого расстояния l_p , среднего по стану коэффициента пластического натяжения Z_{cp} , а также от поперечной разнотолщинности



a



б

Рис. 1. Изменение максимальной (S_{max}), минимальной (S_{min}) и средней (S_{mid}) толщины стенки на переднем (а) и заднем (б) концах трубы 32x2,5 мм ($S^+ = 0,125S_{mid}$ – плюсовой допуск на толщину стенки трубы)

трубы $B_T = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\text{mid}}}$ в ее центральной части и оговоренной соответствующим нормативно-техническим документом величины плюсового допуска на толщину стенки $S^+ = kS_n$ (здесь k – безразмерный коэффициент; S_n – номинальная толщина стенки трубы).

Связь длины утолщенных концов на редуцируемых с натяжением трубах с вышеуказанными параметрами прокатки в общем виде можно описать уравнением [2, 3]

$$L_{n(3)} = K_{n(3)} l_p \sqrt{\mu Z_{cp}}, \quad (1)$$

где $L_{n(3)}$ – длина переднего (заднего) утолщенного конца; $K_{n(3)}$ – эмпирические коэффициенты, имеющие различные значения для переднего и заднего концов трубы.

Принимая гипотезу о *линейном* изменении толщины стенки по длине концевых участков, а также приравнявая величину средней (S_{mid}) и номинальной (S_n) толщин стенки в средней части трубы, можно определить длины концевой обреза на переднем (O_n) и заднем (O_z) концах по формулам

$$O_{n(3)} = \frac{L_{n(3)} [S'_{n(3)} (1 + 0,5B_T) - S_n (1 + k)]}{(S'_{n(3)} - S_n) (1 + 0,5B_T)}, \quad (2)$$

где $S'_{n(3)}$ – толщина стенки на переднем (заднем) торцах трубы.

Значения $S'_{n(3)}$ можно определить по формулам

$$S'_{n(3)} = S_n + (S_{t0} - S_n) (1 - A_{n(3)} Z_{cp}), \quad (3)$$

где S_{t0} – толщина стенки трубы в случае прокатки без натяжения (при $Z_{cp} = 0$); $A_{n(3)}$ – безразмерные коэффициенты, величина которых определяется путем аппроксимации эмпирических либо расчетных (например, полученных по методике [5]) данных.

Связь относительной поперечной разностенности трубы B_T с параметрами прокатки можно охарактеризовать уравнением

$$B_T = \frac{(B_T^{\max} - B_T^{\min}) (Z_{cp}^{\max} - Z_{cp}) (D_0 - D_t)}{Z_{cp}^{\max} (D_0 - D_t^{\min})}, \quad (4)$$

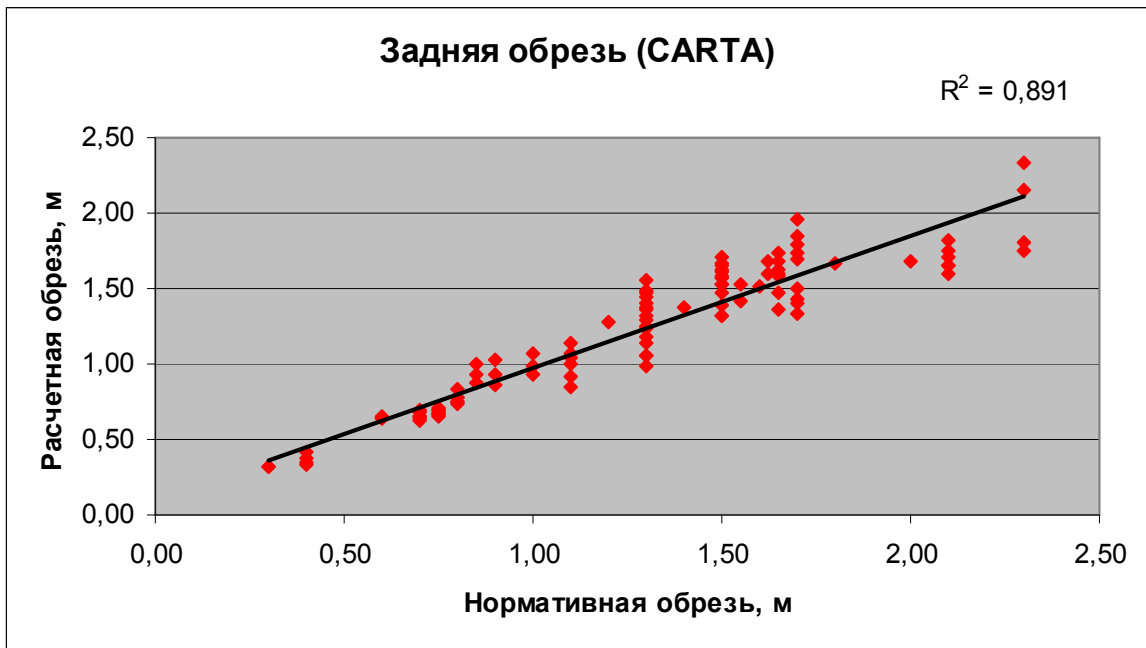
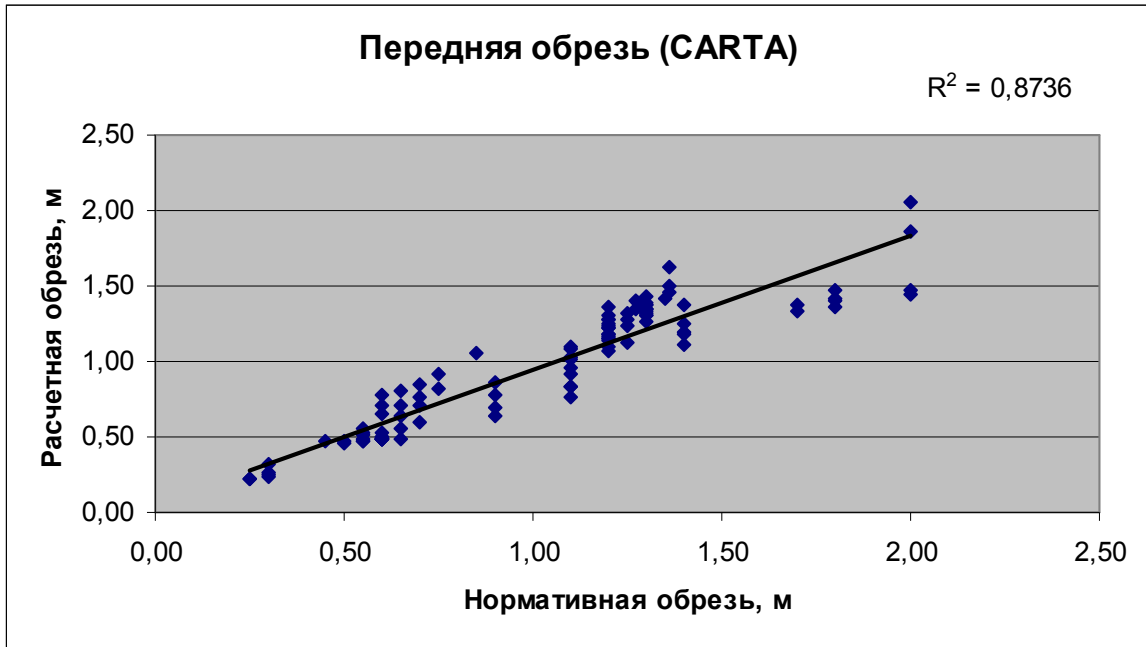
где B_T^{\min} , B_T^{\max} – относительная поперечная разностенность при прокатке из черновой трубы диаметром D_0 трубы минимального в сортаменте стана диаметра D_t^{\min} соответственно при максимальном значении среднего по стану коэффициента пластического натяжения (Z_{cp}^{\max}) и без натяжения ($Z_{cp} = 0$); D_t , Z_{cp} – конкретные величины диаметра прокатываемой трубы и среднего по стану коэффициента пластического натяжения.

Значения B_T^{\max} , B_T^{\min} определяются эмпирическим либо расчетным (например, по методике [6]) путем.

Пути снижения концевой обреза

Как следует из анализа формулы (1) уменьшение величин межклетевых расстояний l_p , вытяжек μ и средних по стану коэффициентов пластического натяжения Z_{cp} должно приводить к уменьшению длины передних L_n и задних L_z утолщенных концов на трубах. Но здесь уместно отметить, что уменьшение величины среднего по редуцированному стану коэффициента пластического натяжения Z_{cp} приводя к уменьшению длины утолщенных концов на трубах, в соответствии с формулой (4) будет повышать относительную поперечную разностенность готовых труб B_T (рис. 2). Увеличение относительной поперечной разностенности готовых труб B_T в соответствии с формулой (2) теоретически может приводить к увеличению длины фактической концевой обреза, однако, как показывают расчеты по вышеприведенной методике, при реальных значениях входящих в формулы (1)-(4) параметров, снижение Z_{cp} должно уменьшать длину концевой обреза. Этот вывод подтверждается практикой.

Учитывая, что изменять межклетевое расстояние l_p на действующем стане невозможно, реальным путем уменьшения концевой обреза на трубах является снижение среднего по стану коэффициента пластического натяжения Z_{cp} за счет соответствующего уменьшения суммарной вытяжки μ в редуцированном стане.



175

Рис. 2. К определению коэффициентов линейной корреляции между нормативными и расчетными значениями концевой обрезки при работающей системе CARTA

В меньшей мере, чем вышеуказанные факторы, на длину утолщенных концов оказывают влияние характер распределения частных пластических натяжений Z_i по межклетевым промежуткам стана, режим распределения частных деформаций m_i по клетям стана, температура прокатки t^o , количество клетей стана n , участвующих в дефор-

мации трубы. Так, например, по данным работы [7] повышение величины Z_i в межклетевых промежутках головной группы клетей редукционного стана при соответствующем уменьшении Z_i в остальных межклетевых промежутках приводит к уменьшению длины концевой обрезки на трубах до 20%.

В соответствии с патентом [8] изменение режима распределения частных обжатий m_i по клетям редуционного стана по определенному «пилообразному» закону приводит к уменьшению поперечной разностенности труб B_T и соответствующему снижению длины концевой обрезки. Уменьшение общего числа участвующих в деформации трубы клеток стана N при соответствующем увеличении частных деформаций m_i снижает концевую обрезку [4].

Одним из радикальных методов уменьшения длины утолщенных концов на редуцируемых с натяжением трубах является использование во время прокатки режима "бегущая волна". Суть этого метода, разработанного в 70-х годах прошлого века специалистами фирмы "Mannesmann", состоит в том, что в процессе входа трубы в стан и во время ее выхода из стана окружные скорости валков изменяют по закону, обеспечивающему максимальное приближение условий деформации к параметрам, имеющим место в установившемся процессе прокатки. Особенностью метода "бегущая" волна является то, что все его преимущества в полной мере могут быть реализованы *только* на редуционно-растяжном стане (РРС) с индивидуальным приводом валков. Попытки применить этот метод на РРС с другим типом привода (например, на РРС с дифференциально-групповым, либо дифференциально-секционным приводом) показали, что в этом случае положительный эффект существенно ниже.

Для станов с *неиндивидуальным* приводом валков эффективным методом уменьшения длины концевой обрезки на редуцируемых с натяжением трубах является применение изменяемого по принципу "скоростной клин" режима прокатки. Такой режим с успехом применяется на большинстве зарубежных редуционных станов подобного типа.

Анализируя факторы, определяющие длину концевой обрезки на трубах, необходимо особо отметить, что ни одна из *детерминированных* математических моделей не может позволить определить этот параметр технологического процесса с высоким уровнем достоверности. Так, например, в работе [1] рассчитана длина утолщенных концов труб по десяти различным формулам; расхождение между полученными результатами и реальной величиной этого параметра достигает 1 м и более. Аналогичные результаты получены при использовании известных формул и методик для определения длины обрезки на трубах, прокатанных в условиях ТПА 30-102 (табл. 1). Полученные результаты объясняются вероятностной природой формирования длины концевой обрезки.

Из вышесказанного следует, что, используя детерминированные модели, следует отдавать себе отчет в том, что получаемые результаты дают невысокую степень достоверности и уровень их соответствия реальным данным относительно невелик.

Для того чтобы иметь возможность пользоваться данными о величине концевой обрезки, полученными на основании использования детерминированных математических моделей, следует эти модели *адаптировать* к условиям конкретного технологического процесса (реального ТПА) путем определения значений аппроксимирующих коэффициентов или функций.

Разработка детерминированной математической модели для определения длины концевой обрезки в условиях ТПА 30-102 ОАО "Интерпайп Нико Тьюб"

В основу детерминированной математической модели для определения длины концевой обрезки в условиях ТПА 30-102 заложили принципы, описываемые формулами (1)–(3). Для уменьшения ошибки, вносимой в расчеты использованием гипотезы о прямолинейном характере изменения толщины стенки по длине концевой участка трубы, формулу для окончательного определения длины концевой обрезки представили в виде

$$\bar{O}_{n(z)} = \mathfrak{R}_{n(z)} \cdot O_{n(z)}, \quad (5)$$

где $\mathfrak{R}_{n(z)}$ – аппроксимирующая функция параметров редуцирования.

В результате статистической обработки эмпирических данных о реальной длине концевой обрезки на передних и задних концах труб, редуцируемых в условиях ТПА 30-102, были получены аппроксимирующие коэффициенты ($K_n = 6,9$; $K_z = 8,5$; $A_n = 0,50$; $A_z = 0,35$) и значения аппроксимирующих функций для расчета длин концевой обрезки.

Используя вышеприведенные аппроксимирующие коэффициенты и функции, разработали программу для расчета длины концевой обрезки в условиях ТПА "30-102".

На рис. 2 и 3 приведено сравнение расчетных и нормативных значений концевой обрезки на переднем и заднем концах труб. Как следует из приведенных данных, уровень соответствия между расчетными и нормативными значениями исследуемых величин весьма высок (коэффициент линейной корреляции R^2 находится в пределах $R^2 = 0,873...0,904$).

Таблица 1. Результаты расчета длины концевой обреза по различным методикам и сравнение с нормативными значениями по ТИ 79-1-2010

Длина утолщенных концов (мм), рассчитанных по формулам (методикам):	Размер труб, мм	До редуцирования	120x3.8	Расхождение с ТИ, %		95x6.8	Расхождение с ТИ, %	
		После редуцирования	42x3	Обычная прокатка	Система CARTA	51x6	Обычная прокатка	Система CARTA
1	2	3	4	5	6	7	8	
А.А. Шевченко	$L_{P,Z} = 2 \cdot a \cdot \sqrt{\lambda}$	1165	$\frac{-14}{-31}$	$\frac{-27}{-42}$	894	$\frac{-1}{-19}$	$\frac{-11}{-26}$	
Г.И. Гуляев и В.А. Юргеленас	$L_{P,Z} = 0.7 \cdot (n-2) \cdot z_{STR}^{0.66} \cdot a$	3217	$\frac{137}{89}$	$\frac{101}{61}$	2029	$\frac{125}{84}$	$\frac{103}{69}$	
D. Valenta	$L_{P,Z} = 2 \cdot a \cdot \lambda \cdot \frac{S_r \cdot D_0 - D_r}{S_0 \cdot D_0} + 150$	1512	$\frac{11}{-11}$	$\frac{-6}{-24}$	1506	$\frac{67}{37}$	$\frac{51}{26}$	
S.Voigt	$L_{P,Z} = 0.95 \cdot (n-2) \cdot a \cdot z_{STR}$	3711	$\frac{173}{118}$	$\frac{132}{86}$	2274	$\frac{153}{107}$	$\frac{127}{90}$	
А.З. Глейберг	$L_P = 2.3 \cdot (\lambda + 1) \cdot \frac{\lambda_{KP}}{\lambda} \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_{KP}} - 1\right)^{0.5} \cdot a$	<u>1643</u>	<u>21</u>	<u>3</u>	<u>1040</u>	<u>16</u>	<u>4</u>	
	$L_Z = 2.3 \cdot (\lambda + 1) \cdot \frac{\lambda_{KZ}}{\lambda} \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_{KZ}} - 1\right)^{0.5} \cdot a$	1327	-22	-34	664	-40	-45	
W.Rodder	$L_{P,Z} = \frac{1}{R} \cdot a \cdot \lambda \cdot 2; R = \frac{1}{1 - \frac{k}{100}}$	2241	$\frac{65}{32}$	$\frac{40}{12}$	1319	$\frac{47}{20}$	$\frac{32}{10}$	
А. Trzaska	$L_P = a \cdot (1.8 \cdot \lambda - 1.8);$ $L_Z = a \cdot (1.8 \cdot \lambda - 0.8)$	<u>1496</u> 1796	<u>10</u> 6	<u>-7</u> -10	<u>659</u> 959	<u>-27</u> -13	<u>-34</u> -20	
Г.И. Гуляев и В.А. Юргеленас	$L_P = 0.0036 \cdot (n-1) \cdot a \cdot \sqrt{z_{str}} \cdot \left(138 + \frac{D_0 - D_r}{0.01 \cdot D_0}\right);$ $L_Z = 0.0095 \cdot (n-1) \cdot a \cdot \sqrt{z_{str}} \cdot \left(46.3 + \frac{D_0 - D_r}{0.01 \cdot D_0}\right)$	<u>3798</u> 5495	<u>179</u> 223	<u>137</u> 175	<u>2254</u> 2989	<u>150</u> 172	<u>125</u> 149	
З-д в Хомутове	$L_{P,Z} = 435 \cdot \lambda \cdot \sqrt[3]{\left[\frac{D_0 - D_r}{D_0}\right] - 0.2}$	1941	$\frac{43}{14}$	$\frac{21}{-3}$	842	$\frac{-6}{-23}$	$\frac{-16}{-30}$	
J.Kotrbaty P.Valasek	$L_P = 5.865 \cdot a \cdot \lambda \cdot z_{str} \cdot \left(1/s_{k,pr}^{0.5}\right);$ $L_Z = 5.865 \cdot a \cdot \lambda \cdot z_{str} \cdot \left(1/s_{k,zad}^{0.4}\right)$	<u>1826</u> 2123	<u>34</u> 25	<u>14</u> 6	<u>778</u> 949	<u>-14</u> -14	<u>-22</u> -21	
Методика ВНИИТИ [4]	-	<u>2856</u> 3511	<u>110</u> 107	<u>79</u> 76	<u>1890</u> 2422	<u>110</u> 120	<u>89</u> 102	
Методика фирмы Mannesmann	-	<u>3476</u> 1549	<u>-156</u> -9	<u>117</u> -23	<u>863</u> 640	<u>-4</u> -42	<u>-14</u> -47	
Методика [2]	-	<u>4802</u> 5979	<u>253</u> 252	<u>200</u> 199	<u>1873</u> 2367	<u>108</u> 115	<u>87</u> 97	
Методика [3]	-	<u>4519</u> 5699	<u>232</u> 235	<u>182</u> 185	<u>1556</u> 2026	<u>73</u> 84	<u>56</u> 69	
Фактическое значение	Из ТИ 79-1-2010 ИЗМЕНЕНИЕ №5 с системой CARTA	1360 1700	-	-	900 1100	-	-	
	Из ТИ 79-1-2010 ИЗМЕНЕНИЕ №5 без системы CARTA	1600 2000	-	-	1000 1200	-	-	

Примечание: числитель – длина обреза переднего конца, знаменатель – длина обреза заднего конца.

Обозначения в формулах: $L_{P,Z}$ - длина утолщенного конца (переднего или заднего), мм; L_P - длина переднего конца трубы, мм; L_Z - длина заднего конца трубы, мм; a - среднее расстояние между клетями, мм; λ - суммарный коэффициент вытяжки; n - число клеток; z_{STR} - средний коэффициент пластического натяжения; λ_{KP} и λ_{KZ} - коэффициент вытяжки переднего и заднего концов трубы соответственно; k - относительное утонение стенки трубы, мм; S_0 - толщина стенки до редуцирования, мм; S_r - толщина стенки после редуцирования, мм; D_0 - внешний диаметр трубы перед редуцированием, мм; D_r - внешний диаметр после редуцирования, мм; $S_{k,pr}$ и $S_{k,zad}$ - наибольшая толщина стенки переднего и заднего конца труб соответственно, мм.

Несмотря на высокий уровень соответствия расчетных и нормативных значений концевой обрезки, рассмотрен вариант уточнения нормативных показателей в соответствии с принципом "меньше натяжение – меньше обрезь". Как показывает статистический анализ, при использовании рекомендуемых норм концевой обрезки среднее расхождение между расчетными и нормативными значениями анализируемых величин будет лежать в пределах $\Delta L = -(16...29)$ мм против имеющего место в настоящее время значения $\Delta L = -(39...58)$ мм. Отметим, что при использовании предлагаемых норм концевой обрезки относительное уменьшение усредненных по сортаменту величин этих показателей составляет 1,3...2,8%.

ВЫВОДЫ

Проанализировано влияние различных параметров редуцирования труб на образование утолщения концов и величину концевой обрезки. Разработана математическая модель для определения норм концевой обрезки применительно к конкретным условиям ТПА 30-102 ОАО "Интерпайп Нико Тьюб", обладающая высокой степенью достоверности. Предложены пути снижения концевой обрезки и выполнен на основании разработанной математической модели расчет норм концевой обрезки для всего сортамента прокатываемых труб. При этом относительное уменьшение концевой обрезки составит 1,3-2,8%, что составит в среднем 1,95-4,2 кг/т экономии металла.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Gocal J., Kotrbatov I., Valasek P. Moznosti zkaraceni delek zesilenych koncu trub pri tahovem redukovani. Ocelove trubky, 1977, **24**, №3. – С. 170-185.
2. Гуляев Ю.Г., Шифрин Е.И., Квитка Н.Ю. Теоретический анализ параметров непрерывной продольной безоправочной прокатки труб на станах с дифференциально-групповым приводом. Теория и практика металлургии, 2007, №4-5. – С. 115-124.
3. Анализ путей уменьшения концевой обрезки при редуцировании труб с натяжением / Ю.Г.Гуляев, И.А.Шапиро, А.Г.Польский и др. – Теория и практика металлургии, 2012, №1-2. – С. 45-48.
4. Технология непрерывной безоправочной прокатки труб / Г.И.Гуляев, П.Н.Ившин, И.Н.Ерохин и др.; Под ред. Г.И. Гуляева – М., Металлургия, 1975. – 264 с.
5. Analysis of Variation of the Mean Wall Thickness in Stretch Reduced Tubes / Gulyayev G.I., Gulyayev Yu.G., Shyfrin Ye.I., Kvitka N.Yu. – 46th Material science & Technology Conference Proceedings. Vol. II. AIST/TMS, New Orleans, Louisiana, 2004. – P. 89-98.
6. The Mathematical Model of Formation of the cross-sectional Wall Thickness Nonuniformity during Longitudinal Plugless Tube Rolling / Gulyayev G.I., Gulyayev Yu.G., Shyfrin Ye.I., Kvitka N.Yu. – 47th Material science & Technology Conference Proceedings. AIST/TMS, Pittsburgh, Pa., 2005. – P.15-25.
7. Кириченко А.Н., Южаков А.П., Жуков А.И. Разработка и освоение новых скоростных режимов при редуцировании труб. Сталь, 1989, №9. – Стр. 64-68.
8. Патент України №77136. Спосіб прокатки труб в багатокільтьовому редуційному стані. Авт.: А.І.Козловський, Ю.Г.Гуляев, Є.І.Шифрін. та ін. Бюлетень промислової власності, 2006, № 10.
9. Повышение точности и качества труб / Ю.Г.Гуляев, М.З.Володарский, О.И.Лев и др.; Под ред. Ю.Г.Гуляева – М.: Металлургия, 1992. – 238 с.
10. Алгоритм статистичної обробки емпіричних даних / Ю.Г.Гуляев, Е.О.Максимова, М.З.Володарський, О.Г.Карпов. – Доповіді АН УРСР, сер. А, 1985, №5. – С. 65-68.