

Attention is drawn to the occurrence of a zone of tensile transverse stresses in the part of the strip located under the horizontal contact surface (see Fig. 4). The reason for the appearance of this zone is that with a reduction in the length of the part of the strip strongly compressed by the side walls of the caliber, it tends to expand. Naturally, not in the direction of the vertical axis of symmetry of the caliber, but in the opposite direction. In addition, the central part of the strip tends to expand. This leads to the fact that compressive transverse stresses arise in the lateral parts, and tensile stresses occur in the near-contact central part. It should be noted that the process of equalizing the velocities is accompanied by the appearance of significant tensile stresses with a value of about 87 MPa.

**Conclusions.** With this deformation pattern, from the point of view of defect formation, the most severe stress state pattern occurs in places corresponding to the horizontal part of the strip contact surface after the strip leaves the rolls.

In accordance with the conditions for rolling out defects, it can be concluded that there are no conditions favorable for rolling out surface defects in this area. If there is a non-metallic inclusion in this area, it will be a stress concentrator. As a result, this will facilitate the formation of deep surface defects.

Another dangerous place is the part of the strip located on the side surface, slightly below its corners. Although the tensile stresses are not very high here (about 66 MPa), when stress concentrators hit this zone, these stresses may be sufficient for the formation of surface defects.

In the central part of the profile and in the area of caliber clearance, tensile stresses are present in some areas of the deformation zone, but their value is too small to make the surface defects.

#### LITERATURE

1. Beda N. I., Kancelson G. M., Konovalov V. S. Production and quality of pipe billets. K. : Technics, 1966. 243 p.
2. Chekmariov A. P., Mashkovtsev R. A., Nosadze A. D. Pipe billet production. M. : Metallurgy, 1970. 304 p.
3. Litvinenko Y. P., Yakovlev A. I. Deformations and stresses when rolling oval bars in a round caliber. *Steel*. 1972. №. 3. P. 246-249.
4. Ilyukovich B. M., Ogurtsov A. P., Nekhaev N. E., Yershov S. V. Theoretical foundations of metal forming: in 2 volumes. Dnepropetrovsk : RIA «Dnepro-VAL», 2002. Volume 2. 485 p.

*Надійшла до редколегії 03.09.2020.*

УДК 621.771.01

DOI 10.31319/2519-2884.tm.2020.4

БИБА Н.В., к.т.н., управл. директор  
ШТОДА М.Н.\*, к.т.н., доцент

MICAS Simulations Ltd.

\*Днепропетровский государственный технический университет

### **ВЛИЯНИЕ ПЕРЕДНЕГО НАТЯЖЕНИЯ НА ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ПРОКАТКЕ КРУГЛЫХ ПОЛОС В ОВАЛЬНОМ КАЛИБРЕ**

**Введение.** Способ непрерывной прокатки в настоящее время является самым часто используемым при производстве длинномерной металлической прокатной продук-

ции. Известно, что отличительной чертой непрерывной прокатки является одновременность деформации в нескольких последовательно расположенных клетях стана. Этим определяется ряд преимуществ непрерывных прокатных станов, и, в то же время, обуславливаются особенности процесса. Главные из которых – это силовое взаимодействие клетей стана между собой через прокатываемую полосу, а также влияние скоростного режима прокатки на напряженно-деформированное состояние металла в каждом очаге деформации.

Важно отметить, что во многих областях прокатного производства эти особенности играют положительную роль. Например, в трубном производстве при прокатке на редуционно-растяжных станах натяжение прокатываемого раската способствует уменьшению толщины стенки трубы до необходимой величины.

В то же время, в сортовом производстве, наоборот, наличие натяжения раската между клетями или группами клетей приводит к заметному снижению точности прокатной продукции. Так, прокатка катанки с натяжением вызывает заметное изменение горизонтального размера раската по клетям. И, как результат, ширина готового профиля уменьшается, особенно в центральной части мотка, что увеличивает овальность профиля [1]. Поэтому прокатку сортовых профилей стараются проводить в режиме, когда натяжение полосы между клетями минимизируется. По ряду причин такая настройка оборудования на практике крайне затруднительна, что наиболее справедливо для высокоскоростных проволочных блоков.

**Постановка задачи.** О том, что «натяжение концов полосы должно уменьшать уширение» [2, стр. 97], известно уже давно. Одновременно с этим, современная теория прокатки утверждает, что «во многих случаях влиянием переднего натяжения можно пренебречь» [2, стр. 97]. И на этом основании, те немногочисленные исследования деформированного состояния металла при непрерывной прокатке были проведены для случаев, когда на раскат действует только заднее натяжение или совместное заднее и переднее натяжения. Немаловажен и тот факт, что большая часть исследований относится к простому случаю прокатки – плоская заготовка на гладкой бочке. В то же время, изменение размеров катанки по длине мотка показывает, что влиянием переднего натяжения на формоизменение металла при прокатке в калибрах системы «овал-круг» пренебречь нельзя. А этот вопрос в теории прокатки пока остается малоизученным.

Целью данной работы является исследование влияния переднего натяжения на деформированное состояние при прокатке круглых полос в овальном калибре.

**Результаты работы.** Для того, чтобы получить наиболее полные сведения о процессах, происходящих в очаге деформации под действием переднего натяжения, проводили и экспериментальные, и теоретические исследования.

Экспериментальная часть работы была выполнена в лаборатории кафедры ОМД Днепропетровского государственного технического университета на стане 210. В качестве заготовки использовали образцы из свинца С1 с условным диаметром (среднее арифметическое между высотой и шириной заготовки) поперечного сечения 5,06...7,71 мм. Размеры валков указаны на рис. 1 и составляли: ширина калибра 8,8 мм; диаметр валков по буртам 210 мм, глубина ручья валка 1,57 мм; высота калибра варьировалась в зависимости от условий эксперимента. Переднее натяжение создавали при помощи блочно-грузового механизма. Величина напряжения натяжения устанавливалась изменением массы груза: 0 кг, 28 кг и 56 кг. Перед каждой прокаткой поверхность образцов и ручьев калибра обезжировали, добиваясь одинаковых значений коэффициента трения на контакте прокатываемого металла с валками. Частота вращения валков составляла 100 об./мин.

Результаты лабораторных исследований представлены в табл. 1.

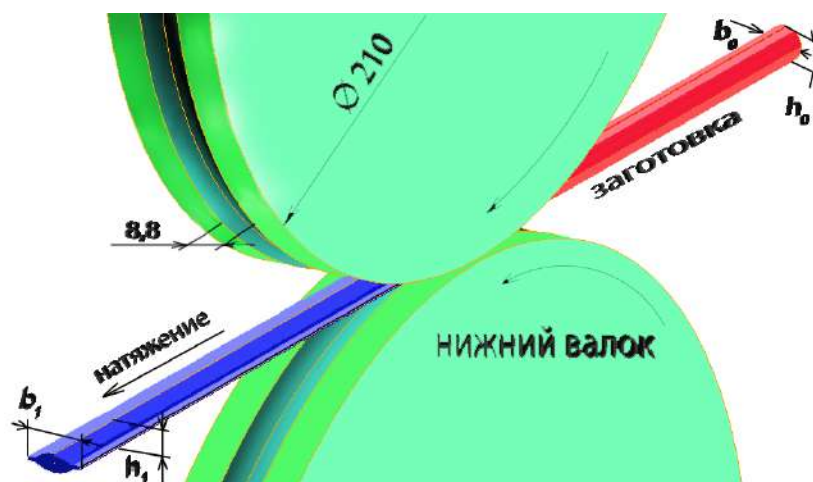


Рисунок 1 – Общий вид очага деформации исследуемого процесса (изображение получено при моделировании в QForm 2D/3D)

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований

№ оп.	№ обр.	Размеры заготовок, мм		Размеры профиля, мм		$\varepsilon$	Масса груза $T_1$ , кг	Напряж. переднего натяжения $\sigma_1$ , МПа
		$h_0$	$b_0$	$h_1$	$b_1$			
1	1	5,02	5,10	3,99	5,78	0,218	0	0,0
	2	5,13	5,16	3,83	5,76	0,258	28	15,9
	3	5,03	5,12	4,00	5,63	0,219	56	31,1
2	4	5,77	5,78	3,83	7,26	0,337	0	0,0
	5	5,77	5,80	3,81	7,34	0,343	28	12,5
	6	5,74	5,80	3,95	6,94	0,319	56	25,5
3	7	5,76	5,79	3,49	7,24	0,397	0	0,0
	8	5,74	5,88	3,47	6,82	0,410	56	29,6
4	9	7,67	7,73	3,86	12,01	0,501	28	7,5
	10	7,69	7,73	3,96	10,71	0,488	56	16,5

Теоретическую часть работы выполняли в программном комплексе для моделирования и оптимизации процессов обработки металлов давлением QForm 2D/3D. Моделирование проводили для четверти образца, что позволило сократить время на решение задачи. На основании предварительных исследований для условий на контакте полосы с валками выбрали закон трения Кулона с коэффициентом трения 0,45, что наиболее точно отвечало условиям эксперимента. Остальные граничные условия выбраны из стандартных библиотек программного комплекса QForm в соответствии с условиями натурального эксперимента. В программе QForm существует возможность задавать переднее натяжение прокатываемой полосы в виде силы (в кН) или как давление (в МПа), приложенные к торцу заготовки. В связи с тем, что в лаборатории натяжение создавали путем изменения массы груза, при моделировании его удобнее было задавать как давление отрицательной величины (направленное по ходу прокатки), действующее на переднем торце раската.

Результаты расчета коэффициента уширения при моделировании в QForm приведены в табл. 2. Как видно, ошибка не превышает инженерной точности. Из рис. 2 видно, что и характер изменения коэффициента уширения при изменении параметров

процесса прокатки соответствует практике. То есть, процесс прокатки круглых полос в овальных калибрах с передним натяжением можно исследовать, опираясь на результаты моделирования в QForm.

Таблица 2 – Сравнение результатов теоретических исследований и расчетных данных с лабораторными исследованиями

№ оп.	№ обр.	Лабораторные исследования					Формула (2)			Теоретические исследования	
		$b_1$	$\Delta h$	$\varepsilon$	$1-\sigma_1/\sigma_m$	$\beta'$	$\beta_{нат}$	$\delta^b$	$\beta_{нат}^{QForm}$	$\delta_b^{QForm}$	
		мм	мм								%
1	1	5,78	1,11	0,218	1,00	1,13	1,17	2,9	1,071	5,9	
	2	5,76	1,33	0,258	0,47	1,12	1,16	4,3	1,085	2,9	
	3	5,63	1,12	0,219	-0,04	1,1	1,12	1,4	1,031	6,6	
2	4	7,26	1,95	0,337	1,00	1,26	1,25	0,1	1,194	5,2	
	5	7,34	1,99	0,343	0,58	1,27	1,23	2,9	1,231	2,8	
	6	6,94	1,85	0,319	0,15	1,2	1,17	1,9	1,086	10,2	
3	7	7,24	2,3	0,397	1,00	1,25	1,34	7,2	1,278	2,2	
	8	6,82	2,41	0,410	0,01	1,16	1,27	9,5	1,133	2,4	
4	9	12,01	3,87	0,501	0,75	1,55	1,53	1,8	1,609	3,5	
	10	10,71	3,77	0,488	0,45	1,39	1,45	4,8	1,501	7,7	

Ранее были получены эмпирические формулы [3] для расчета коэффициента уширения при прокатке стальных круглых профилей в овальных калибрах без натяжения:

$$\beta_{ct} = 0,943 + 0,113 \frac{h_0}{h_1} + 0,004 \frac{D_b}{h_1} + 0,014 \frac{B_k}{b_0}, \quad (1)$$

где  $h_0, h_1$  - высота круглого профиля (заготовки) и овального калибра, соответственно;

$D_b$  - диаметр валков по буртам;

$B_k, b_0$  - ширина овального калибра и ширина круглого профиля (заготовки).

Как известно, на величину коэффициента уширения при прокатке, кроме натяжения, влияют реологические свойства и коэффициент трения в очаге деформации. Эти параметры, в свою очередь, зависят от материала прокатываемого образца. На практике это выглядит как разница в коэффициенте уширения при прокатке образцов из разных материалов. Для расчета коэффициента уширения при прокатке свинцовых образцов в овальных калибрах по формуле (1) необходимо ввести эмпирический поправочный коэффициент:

$$k_{cb} = \frac{\beta_{ct}}{\beta_{cb}} = 0,971 + 0,404 \frac{h_0}{h_1} + 0,22 \left( \frac{h_0}{h_1} \right)^2,$$

где  $\beta_{ct}$  - коэффициент уширения при прокатке круглых стальных образцов в овальных калибрах по формуле (1);

$\beta_{cb}$  - коэффициент уширения при прокатке круглых свинцовых образцов в овальных калибрах.

А для учета влияния переднего натяжения при прокатке в овальном калибре круглого профиля используем коэффициент из работы [4]:

$$\tilde{N}_{\sigma_1}^H = \exp \left( -0,66 \frac{\delta - 1}{\delta^2} \frac{\sigma_1}{2k} \right),$$

где  $\frac{\sigma_1}{2k} = \frac{\sigma_1}{\sigma_s}$  - относительное переднее натяжение;

$\sigma_s$  - напряжение сопротивления деформации;

$\delta$  - коэффициент, характеризующий условие захвата полосы валками ( $\delta > 2$  - соответствует естественному захвату;  $\delta = 2$  - максимальный естественный захват;  $2 \geq \delta \geq 1$  - сверхобжатие;  $\delta \leq 1$  - пробуксовка, прокатка без принудительной подачи полосы в валки затруднена или невозможна).

$$\delta = \frac{2\mu l_d}{\Delta h},$$

где  $\mu$  - коэффициент трения в очаге деформации;

$l_d$  - длина очага деформации, по соответственной полосе;

$\Delta h$  - абсолютное обжатие, по соответственной полосе.

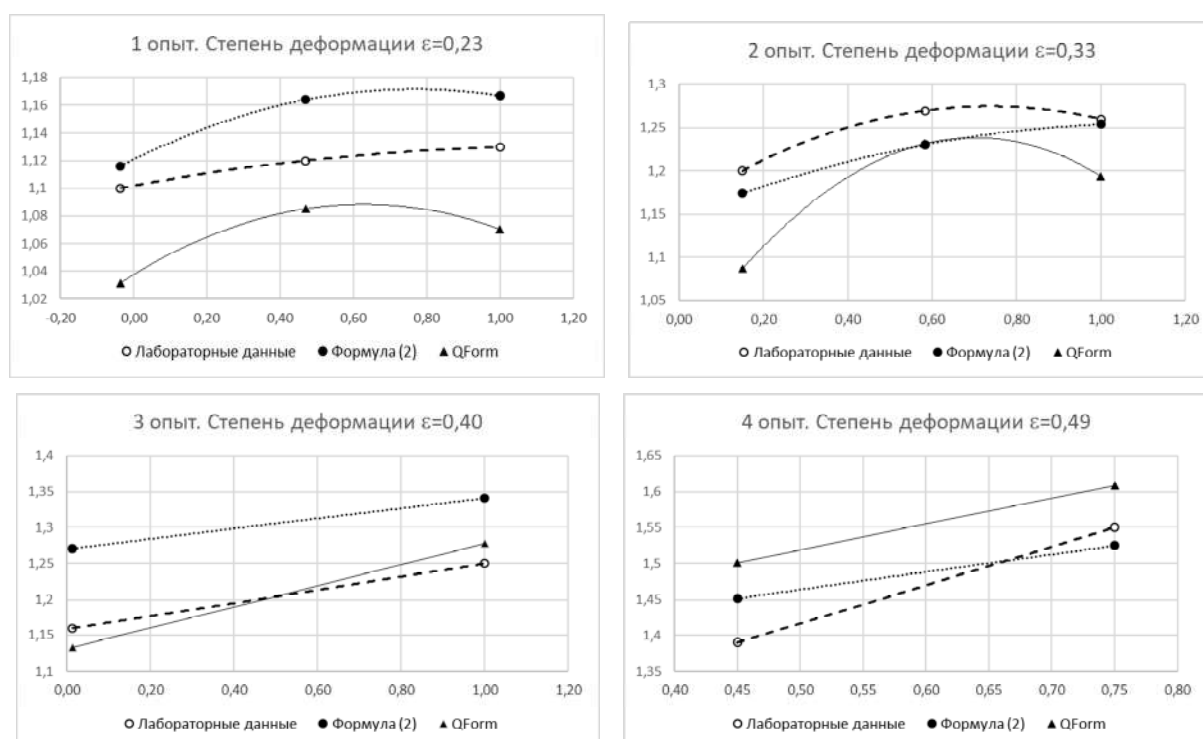


Рисунок 2 – Графики зависимости коэффициента уширения от переднего натяжения

Окончательная эмпирическая формула для расчета коэффициента уширения при прокатке свинцовых круглых полос в овальном калибре с передним натяжением

$$\beta_{cb} = \tilde{N}_{\sigma_1}^H \cdot k_{cb} \cdot \beta_{ct}. \quad (2)$$

Результаты расчетов коэффициента уширения по формуле (2) для случаев, реализованных в лаборатории, приведены в табл. 2 и графически представлены на рис. 2. Как видно, ошибка определения ширины профиля по эмпирической формуле (2) и при моделировании в программном комплексе QForm 2D/3D соизмеримы. Что позволяет утверждать о возможности использования этого программного продукта в качестве инструмента для теоретического эксперимента.

Результаты теоретических и практических исследований, представленных в работе, показывают, что с увеличением переднего натяжения величина коэффициента

уширення знижується (см. рис. 2), що не суперечить існуючим положенням сучасної теорії прокатки. Деякий ріст коефіцієнта уширення при збільшенні напруження  $\left(1 - \frac{\sigma_1}{\sigma_s}\right)$  від 1 до 0,5 в першому і другому дослідах, пояснюється збільшенням обжаття.

**Висновки.** В роботі показано адекватність емпіричної формули, пропонуваної для інженерних розрахунків, і можливість використання математичної моделі на основі програмного комплексу QForm 2D/3D при теоретичних дослідженнях.

З результатів роботи видно, що з збільшенням напруження коефіцієнт уширення зменшується, це не суперечить існуючим положенням сучасної теорії прокатки.

Використання результатів роботи в автоматизованих системах проволочних прокатних станів дозволяє розробляти інноваційні ресурсозберігаючі технології виробництва катанки на існуючому обладнанні зі зменшеним витратним коефіцієнтом, порівняно з існуючими.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дудник Ю. В., Чернявін С. О., Татарульєв А. В. Влияние натяжения раската в межклетьевых промежутках проволочного стана на геометрические размеры катанки. *Сталь*. 1988. № 12. С. 40-42
2. Грудєв А. П. Теорія прокатки. М. : Металлургія, 1988. 240 с.
3. Уширення при прокатці в калібрах витяжної системи «овал – круг» / М. Н. Штода і др. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: *Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків : НТУ «ХП», 2016. № 30(1202). С. 79–87.
4. Бахтинов Ю. Б., Тарасевич Ю. Ф., Пименов А. Ф. К учету влияния межклетьевых сил на величину уширения при непрерывной прокатке. *Производство проката*. 2007. № 10. С. 2–4.

Поступила в редакцію 27.08.2020.

УДК 621.774.35

DOI 10.31319/2519-2884.tm.2020.5

СОЛОВЬОВА І.А., к.т.н., доцент  
НИКОЛАЄНКО Ю.М., ст. викладач

Національна металургійна академія України, м. Дніпро

#### АНАЛІЗ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТОЧНОСТІ ТРУБ ПРИ БЕЗОПРАВОЧНОМУ ВОЛОЧІННІ

**Вступ.** Дослідженню вдосконалення технології безоправочного волочіння присвячено багато наукових робіт сучасних вчених: Орлова Г.А, Каргіна Б.В., Окулова Р.А., Паршина С.В. та інших. Ці роботи спрямовані на вивчення: волочіння в блок волок; волочіння через волоку, що обертається; моделювання процесу волочіння.

У роботах вирішуються питання, що дозволяють збільшити ступінь деформації при волочінні, продуктивність, зв'язати зміни товщини стінки з енергосиловими параметрами процесів. У світі сучасних вимог до точності труб виникає інтерес до проблеми зміни різностінності труб після волочіння для прогнозування точності готових труб.