

УДК 621.771.6(049)

Леготкин Г. И.  
Слепынин А. Г.  
Драгобецкий В. В.

## МЕХАНИЗМЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТОНКОСТЕННОГО ПРОКАТА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Выявление механизмов пластического формоизменения тонкостенного проката позволяет их использовать для воздействия на процесс формирования изделий, изменения напряженно-деформированного состояния металла, получения необходимого качества и, что очень важно, иметь технологическую возможность его производства.

В соответствии с работами [1–5], процесс пластического формоизменения можно представить в виде основного и дополнительного нагружений. Дополнительное (управляющее), как и основное, реализуется за счет внешнего воздействия на очаг деформации. Примером может служить внешнее натяжение или подпор, искривляющее, скручивающее или выравнивающее действие линеек, проводок на полосу при прокатке и т. д.

Экспериментальные данные показывают, что дополнительное нагружение на очаг деформации реализуется при усилиях и моментах значительно меньших основного [1–2]. Эта особенность пластического деформирования отличается от нагружения в упругой зоне. При совместном действии разных формирующих нагрузок в упругой зоне суммарное напряжение представляется, как сумма отдельно взятых напряжений (метод суперпозиции), т.е. без эффекта дополнительного воздействия. В пластической же области дополнительное нагружение создает благоприятные предпосылки для совмещения технологических операций в процессе обработки. Например, обжатие и изгиб, совмещение продольного и поперечного изгиба при холодной правке и т. д.

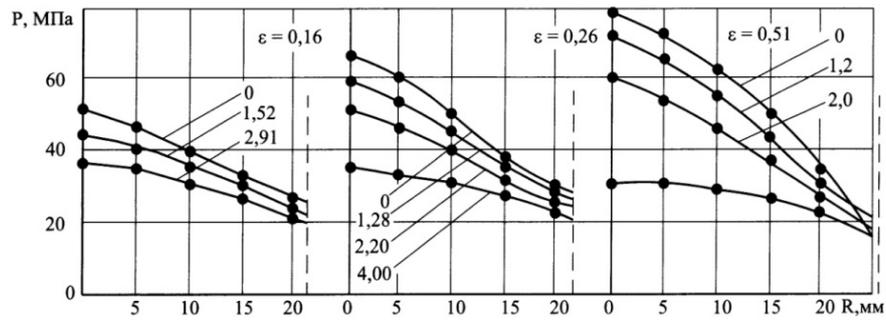
Если в качестве дополнительного воздействия использовать неравномерность пластической деформации, тогда возникают дополнительные напряжения и выравнивающее действие внешних зон, вызывающие изменения напряженного и деформированного состояния в локальных зонах очага деформации. Появление таких локальных зон нагружения и течения металла можно использовать как регулирующий фактор всего процесса формоизменения.

Цель работы – на основании данных экспериментальных и теоретических исследований показать эффекты и механизмы пластического формоизменения, определяющие напряженное и деформированное состояние металла в процессе прокатки тонкостенных изделий.

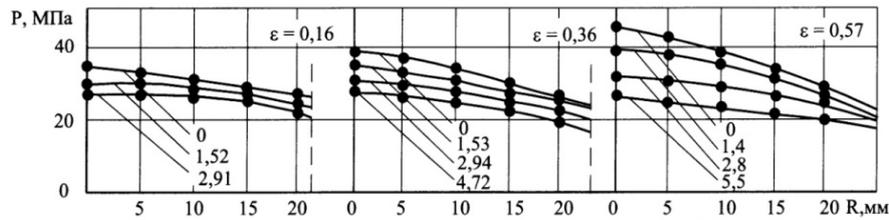
В работах [4, 5] показано дополнительное воздействие на очаг деформации в виде скручивания осаживаемого образца. На рис. 1 представлены результаты замеров контактных напряжений. Снижение контактных напряжений происходит с увеличением фактора формы  $D_o/H_o$ , степени деформации  $\varepsilon$  и параметра  $\eta_\phi = \varphi_\phi/\varepsilon$ , где  $\varphi_\phi$  – угол поворота бойка. Круче-

ние увеличивает сдвиговые деформации в разных направлениях. Это повышает интенсивность деформаций  $A$ .

Для оценки эффекта дополнительного воздействия при прокатке [6] были проведены лабораторные экспериментальные исследования, определяющие силы и моменты со стороны внешней частей полосы, действующие на очаг деформации. Это достигалось несимметричным обжатием по ширине полосы (рис. 2) и выравнивающим действием боковой линейки, в которой была вмонтирована установка для замера силы (рис. 3).



а



б

Рис. 1. Эпюры контактных напряжений при осадке с кручением: а –  $D_0/H_0 = 4$ , б –  $D_0/H_0 = 2$ ; цифры у кривых – значения  $\eta_\phi$

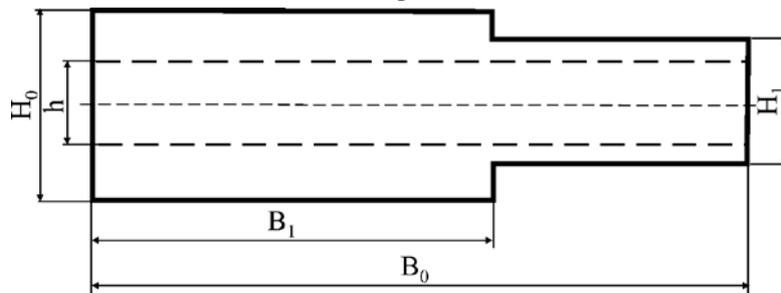


Рис. 2. Несимметричный ступенчатый образец

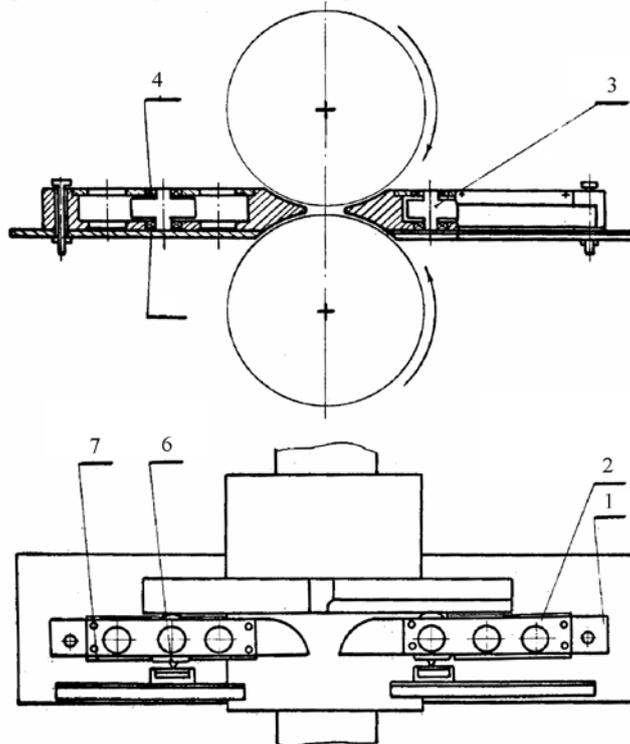


Рис. 3. Схема установки для замера давлений на линейки

На рис. 4 показана типовая осциллограмма давлений на боковые линейки полосы со стороны входа и выхода из очага деформации. В табл. 1 представлены экспериментальные данные по замеру сил.

Силы, действующие на линейки со стороны входа, больше сил со стороны выхода и находятся в пределах 480,0...1952,0 Н и 212,0...838,0 Н соответственно. Моменты сил в пределах 40,5...162,0 Нм со стороны входа и со стороны выхода 30,5...120,9 Нм.

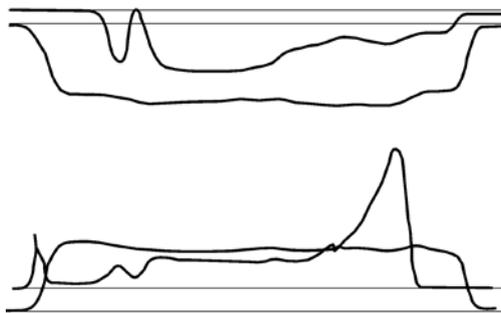


Рис. 4. Осциллограммы давлений на боковые линейки

Сопоставляя моменты пластического изгиба на входе (152,0...234,2 Нм) и выходе (97,9...197,5 Нм) с экспериментальными значениями, убеждаемся, что последние по величине значительно меньше. Это подтверждает тезис об эффекте дополнительного воздействия, при котором силы или моменты формоизменения дополнительного воздействия меньше сил или моментов основного. Продолжая анализ, можно убедиться, что относительная величина  $M_{экс} / M_{пл}$  изменяется в соответствии с параметром  $\delta$  (относительный момент статической деформации), который связан с неравномерностью деформации по ширине профиля.

Со стороны входа и выхода они запишутся в виде:

$$\text{на входе } \delta_{вх} = \frac{\sum 2 \cdot S_{k0} \cdot z_k \cdot \frac{a_k}{1+a_k} \cdot \ln \frac{\mu_{ср}}{\mu_k}}{W_{пл.вх.}},$$

$$\text{на выходе } \delta_{вых} = \frac{\sum 2 \cdot S_{k1} \cdot z_k \cdot \frac{1}{1+a_k} \cdot \ln \frac{\mu_{ср}}{\mu_k}}{W_{пл.вых.}},$$

где  $S_{k0}$  и  $S_{k1}$  – площади поперечных сечений отдельных элементов профиля;  $\mu_{ср}$  и  $\mu_k$  – коэффициенты средней и частной вытяжек;  $z_k$  – координаты точек приложения продольных сил в плоскостях входа и выхода из очага деформации;  $a_k$  – коэффициент, определяющий соотношение дополнительных напряжений на входе и выходе из очага деформации;  $W$  – момент сопротивления на входе и выходе из очага деформации.

Из анализа следует, что дополнительное воздействие связано с неравномерной деформацией, а неравномерная деформация с дополнительными напряжениями, определяемые значением  $\ln \frac{\mu_{ср}}{\mu_k}$ . Для подтверждения связи дополнительного воздействия с дополни-

тельными напряжениями были использованы экспериментальные данные работы [7]. По результатам работы были определены дополнительные напряжения подпора и растяжения через экспериментальные коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$ :

$$\text{подпор } \sigma_n = \beta \sigma_u \cdot (k_1 - 1), \text{ растяжение } \sigma_p = \beta \sigma_u \cdot (1 - k_2).$$

Таблица 1

Экспериментальные значения сил и моментов со стороны боковых линеек

№/ №	$\frac{B_1}{B_0}$	$\frac{H_1}{H_0}$	Значения сил $P_{вх}$ и $P_{вых}$ , Н		Значения моментов сил $M_{вх}$ и $M_{вых}$ , Нм		Отно- шение $\frac{P_{вх}}{P_{вых}}$	Отно- шение $\frac{M_{вх}}{M_{вых}}$
			Вход	Выход	Вход	Выход		
1	0,91	0,87	628,0	275,0	53,60	39,5	2,3	1,4
2	0,78	0,83	1080,0	490,0	91,5	70,6	2,2	1,3
3	0,62	0,87	1115,0	487,0	96,1	70,2	2,3	1,4
4	0,52	0,91	1051,0	485,0	93,6	69,8	2,2	1,3
1	0,93	0,73	932,0	376,0	75,6	54,1	2,5	1,4
2	0,77	0,76	1340,0	550,0	110,7	79,2	2,5	1,4
3	0,62	0,72	1952,0	780,0	162,0	112,3	2,5	1,4
4	0,52	0,77	1783,0	770,0	153,0	111,0	2,3	1,4
1	0,92	0,88	564,0	250,0	48,5	36,0	2,3	1,3
2	0,77	0,88	955,0	390,0	83,2	56,2	2,5	1,5
3	0,62	0,83	1210,0	563,0	105,0	81,0	2,2	1,3
4	0,52	0,80	1500,0	689,0	132,6	99,4	2,2	1,3
1	0,92	0,76	772,0	319,0	62,4	46,5	2,4	1,4
2	0,77	0,75	1225,0	478,0	100,2	69,0	2,6	1,5
3	0,62	0,75	1805,0	786,0	151,2	113,2	2,3	1,3
4	0,52	0,74	1860,0	838,0	157,5	120,9	2,2	1,3
1	0,93	0,82	480,0	212,0	40,5	30,5	2,3	1,3
2	0,78	0,83	888,0	380,0	75,8	54,7	2,3	1,4
3	0,63	0,79	1325,0	580,0	115,5	83,5	2,3	1,4
4	0,52	0,82	1250,0	559,0	109,0	80,6	2,2	1,5
1	0,93	0,66	680,0	257,0	55,5	37,0	2,6	1,5
2	0,77	0,65	1255,0	505,0	104,0	72,8	2,5	1,4
3	0,63	0,67	1290,0	520,0	109,8	74,9	2,5	1,4
1	0,91	0,80	502,0	212,0	42,3	30,5	2,4	1,4
2	0,75	0,83	840,0	378,0	71,6	54,5	2,2	1,3
3	0,62	0,87	870,0	403,0	73,6	57,6	2,2	1,3
4	0,53	0,82	1062,0	541,0	94,4	77,8	2,0	1,2
1	0,90	0,86	709,0	298,0	59,4	42,9	2,4	1,4
2	0,76	0,91	839,0	374,0	72,5	53,8	2,3	1,3
3	0,69	0,90	1068,0	479,0	90,8	69,1	2,2	1,3
4	0,50	0,84	14110	694,0	125,3	99,9	2,0	1,3

Из условия равновесия получены значения моментов со стороны боковых линеек

$$M_{вх} = \beta \sigma_u \cdot \frac{S_0}{2 \cdot H} \cdot \frac{(k_1 - 1) \cdot (1 - k_2)}{k_1 - k_2},$$

$$M_{вых} = \beta \sigma_u \cdot \frac{S_1}{2 \cdot h} \cdot \frac{(k_1 - 1) \cdot (1 - k_2)}{k_1 - k_2}.$$

Определение моментов со стороны боковых линеек согласно экспериментальным данным [6] по приведенным выше выражениям показывает, что отклонение данных от экспериментальных не превышают в своей основе 5...10%. Из этого следует, что природа напряжений основного и дополнительного воздействия – разная. Если изгиб представляет собой основное нагружение, то нормальные напряжения изгиба должны достигать своего максимального значения равными пределу текучести. Если полоса в процессе прокатки вы-

равнивается линейками, то это дополнительное воздействие, момент которого уже не определяется напряжениями, равными пределу текучести. Для выравнивания искривления полосы или вытяжек, согласно закона дополнительных напряжений, возникает взаимодействие различно обжимаемых элементов профиля и внешних зон, которые определяют дополнительные напряжения.

Отношение моментов  $M_{экс}/M_{пл}$  меньше единицы и колеблется в пределах 0,2...0,8, что практически подтверждает эффект дополнительного воздействия. При этом увеличение или уменьшение этого отношения находится в определенной зависимости от параметра  $\delta$ , который, как и отношение моментов, является безразмерной величиной. Такое соответствие подтверждается получением экспериментальных зависимостей, представленных на рис. 5, рис. 6.

Математическая обработка экспериментальных результатов методом наименьших квадратов позволила получить выражения:

$$\text{на выходе } M_{вых} = 1,827 \cdot M_{пл.вых} \cdot \left[ \frac{\sum 2 \cdot S_{k1} \cdot z_k \cdot \frac{1}{1+a_k} \cdot \ln \frac{\mu_{cp}}{\mu_k}}{W_{вых}} \right]^{0,485}, \quad (1)$$

$$\text{на входе } M_{вх} = 1,938 \cdot M_{пл.вх} \cdot \left[ \frac{\sum 2 \cdot S_{k0} \cdot z_k \cdot \frac{a_k}{1+a_k} \cdot \ln \frac{\mu_{cp}}{\mu_k}}{W_{вх}} \right]^{0,443}, \quad (2)$$

$$\text{где } a_k = 1,2995 - 0,1455 \cdot \left(\frac{l_d}{h_{cp}}\right) - 0,1518 \cdot \left(\frac{l_d}{h_{cp}}\right)^2 + 0,0643 \cdot \left(\frac{l_d}{h_{cp}}\right)^3 - 0,0064 \cdot \left(\frac{l_d}{h_{cp}}\right)^4.$$

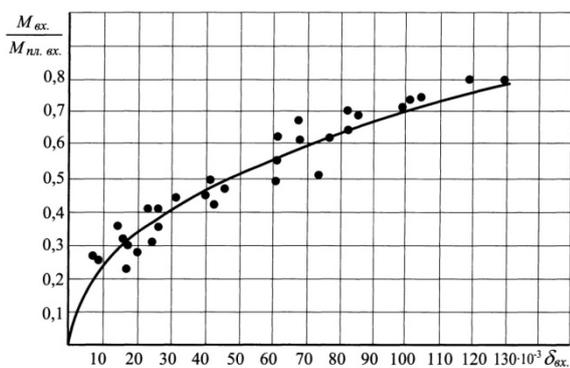


Рис. 5 Зависимость отношения  $M_{вх}/M_{пл.вх}$  от параметра  $\delta_{вх}$  на входе в очаг деформации

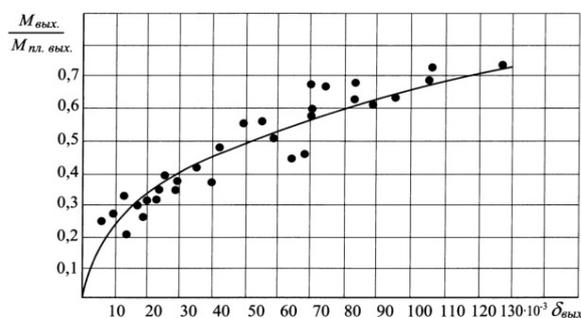


Рис. 6. Зависимость отношения  $M_{вых}/M_{пл.вых}$  от параметра  $\delta_{вых}$  на выходе из очага деформации

Выражения (1) и (2) позволяют не только рассчитать значения моментов со стороны линеек при прокатке сложных профилей, но и наглядно продемонстрировать сам эффект дополнительного воздействия, в рамках которого обозначилась выше приведенная закономерность.

Если эффект дополнительного воздействия имеет место, то возможно ли его использовать в качестве управляющего механизма, позволяющего регулировать напряженное состояние металла. Это возможно, если в очаге деформации изменить продольное взаимодействие различно обжимаемых участков полосы. Продольное взаимодействие определяется способностью течения металла в смежных элементах профиля. Продольную деформацию можно изменить, если изменить поперечную в каждом элементе. В тонкостенной части профиля воздействие на поперечное течение в последних проходах представляется проблематичным. Низкая

температура, отсюда пластичность, большой коэффициент подпора, значительные продольные дополнительные напряжения сжатия. Кинематика течения металла в тонкостенной части профиля должна быть «сходящей», обладающей способностью совмещения обжатия и поперечной деформации в единый процесс. Таким условиям отвечает поперечный пластический сдвиг. Для подтверждения этого положения в условиях прокатного стана 210 был проведен лабораторный эксперимент с формированием тонкостенной части в виде волновой поверхности (рис. 7). Прокатывались полосы в условиях неравномерной деформации по ширине. При этом фиксировалась сила прокатки. Разные параметры «волны» определяли разную ширину центрального элемента и, следовательно, разную поперечную деформацию. Отсюда, разную величину продольного взаимодействия, силы прокатки (табл. 2).

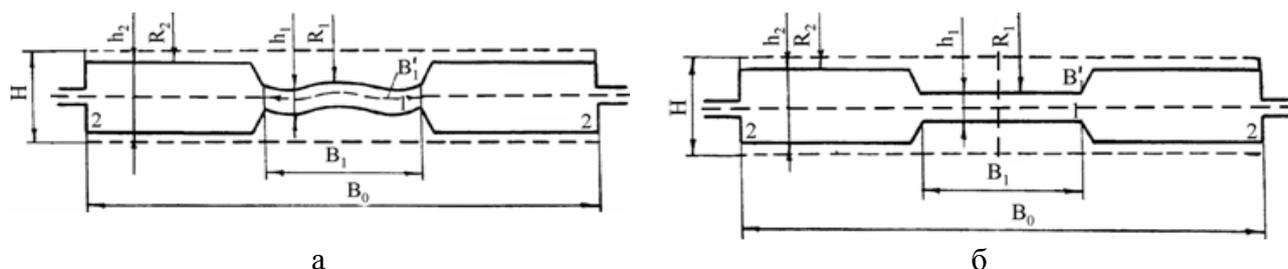


Рис. 7. Разнотолщинные профили с волнообразной и плоской и центральной частями

Дополнительное воздействие, которое оказывают линейки или проводки через внешние «концы» раската на очаг деформации вызывает появление напряжений, способных выровнять или изменить вытяжки по высоте и ширине полосы. Они определяют кинематические и силовые параметры течения металла. Определяют напряженное состояние отдельных участков профиля, увеличивая или уменьшая контактные давления [8], [9]. Изменяют силу прокатки.

Таблица 2

Экспериментальные значения относительных усилий прокатки  
в зависимости от коэффициента поперечной деформации

Толщина, Н мм	Отношение $S_1 / S_0$	Коэффициент поперечной деформации $B_1' / B_1$			
		1,00	1,06	1,08	1,11
		Отношение сил $P_1 / P_0$			
2,0	0,42	1,00	0,94	0,92	0,90
	0,50	1,00	0,95	0,94	0,90
	0,80	1,00	0,96	0,94	0,89
3,0	0,42	1,00	0,94	0,93	0,89
	0,50	1,00	0,94	0,93	0,90
	0,80	1,00	0,95	0,94	0,89
4,0	0,42	1,00	0,96	0,94	0,91
	0,50	1,00	0,97	0,96	0,90
	0,80	1,00	0,96	0,95	0,82
5,0	0,42	1,00	0,96	0,95	0,92
	0,50	1,00	0,97	0,97	0,91
	0,80	1,00	0,96	0,96	0,94
6,0	0,42	1,00	0,97	0,95	0,92
	0,50	1,00	0,98	0,97	0,92
	0,80	1,00	0,99	0,97	0,93
7,0	0,42	1,00	0,96	0,94	0,92
	0,50	1,00	0,98	0,97	0,92
	0,80	1,00	0,98	0,97	0,93

В результате проведенных экспериментальных исследований стало очевидно, что увеличение в процессе прокатки ширины сильно деформированного участка изменяет продольное взаимодействие элементов профиля, снижает общее усилие прокатки. Так при прокатке полосы толщиной 3 мм и отношения площадей сечений элементов  $S_1/S_0$  в пределах 0,42...0,80, при увеличении коэффициента поперечной деформации 1-го элемента  $B_1'/B_1$  от 1,06 до 1,11, относительное усилие прокатки  $P_1/P_0$  уменьшилось от 0,94 до 0,89, табл. 2. При этом на тонких полосах изменение давлений больше, чем на толстых полосах. В несколько меньшей степени изменяется сила прокатки при  $S_1/S_0=0,8$ . Привлекательным становится вариант, когда вместо дополнительного сжатия появляется растяжение.

Зависимости расчетных значений относительного усилия  $P/P^b$  от коэффициента поперечной деформации элемента с большим обжатием представлены на рис.8. При такой кинематике течения имеет место снижение относительной силы прокатки.

Для профиля обода в чистовых проходах имеет место соотношение площадей сечений  $S_1/S_0=0,25$ . В этом случае снижение давления при заданной поперечной деформации наиболее заметно. Представляются новые технологические возможности для воздействия на процесс формирования профиля, в том числе получения проката минимальной толщины.

На рис. 9 и 10 изображены сечения чистового и предчистового шаблонов профилей ободьев разной конструкции. Такой режим пластической деформации в чистовом проходе определяет форму готового профиля. Если форма изделия не влияет отрицательно на его эксплуатационные и прочностные характеристики, то профиль и его конструктивное решение определяется кинематическими условиями формоизменения.

Реализация данного эффекта при формировании тонкостенной части профиля позволяет «выдавить» минимальную толщину, обеспечить производство высокоэффективных изделий сниженной металлоемкости.

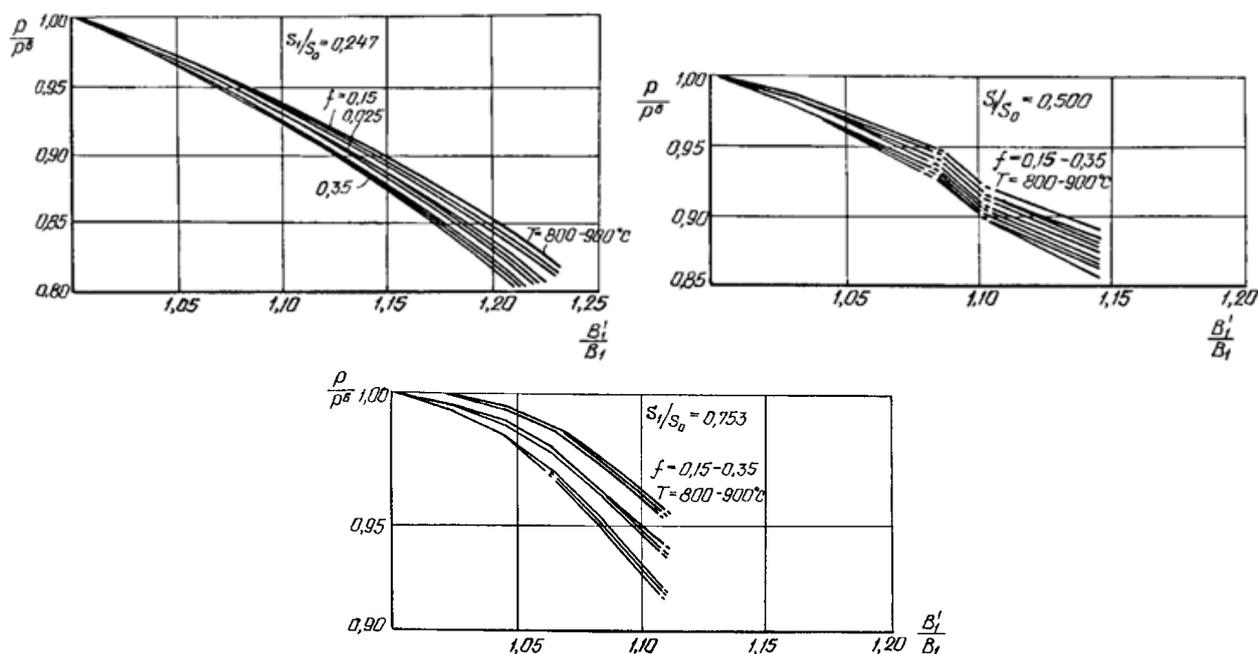


Рис. 8. Зависимость относительных усилий прокатки от коэффициента поперечной деформации сильно обжимаемого элемента профиля



Рис. 9. Чистовой и предчистый шаблоны при прокатке обода с центральной волнообразной частью



Рис. 10 Чистой и предчистый шаблоны при прокатке обода с «раскатной волной»

Получение тонкостенной продукции способом периодической прокатки имеет много общего с получением тонкостенных изделий для ободьев колес грузовых автомобилей. Прежде всего, это присутствие неравномерности пластической деформации, но в разных направлениях течения. При прокатке заготовок компрессорных лопаток продольное перемещение металла реализуется в условиях нарастания и убывания обжатия по длине очага деформации [10]. Формируется контур отставания и опережения. Течение металла в тонкостенной части профиля реализуется не линейными, а сдвиговыми деформациями (рис. 11). Формирование такой кинематики течения позволило реализовать процесс производства тонкостенных изделий из титановых сплавов, обеспечивая снижение силы формоизменения, расходного коэффициента, повышения качества готовой продукции.



Рис. 11. Участок перехода от замковой части к перьевой

Появление сдвиговых деформаций в данной части профиля необходимо связать с экспериментальными данными по замеру сил и моментов прокатки по длине периодического раската. При прокатке заготовок лопаток с убыванием обжатия, в тонкостенной части профиля присутствуют продольные растягивающие напряжения в очаге деформации, определяющие эффект снижения силы, возможности получения тонкостенной части изделия.

## ВЫВОДЫ

1. Экспериментально и теоретически показаны эффекты пластического формоизменения при прокатке тонкостенных профилей.
2. Использование механизмов пластического течения при прокатке тонкостенных изделий позволяет воздействовать на силовые и кинематические параметры процесса, обеспечить получение необходимой тонкостенности и высокого качества проката.
3. Реализация эффектов формоизменения в чистовых проходах определяет новые подходы проектирования профилей разного назначения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Производство высокоэффективного металлопроката* / В. В. Чигиринский, В. Л. Мазур, Г. И. Леготкин [и др.]. – Днепропетровск : «Дніпро-ВАЛ», 2006. – 265 с. (с ил.).
2. Чигиринский В. В. Экспериментальное исследование моментов сил при стремлении полосы к искривлению на входе в очаг деформации и выходе из него / В. В. Чигиринский // *Изв. вузов. Черная металлургия.* – 1983. – № 11. – С. 85–88.
3. *Производство тонкостенного проката специального назначения* / В. В. Чигиринский, Ю. С. Кресанов, А. Я. Качан [и др.]. – Запорожье : «ВАЛПИС», 2014. – 295 с. (с ил.).
4. *Контактное трение в процессах обработки металлов давлением* / А. Н. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. П. Буркин [и др.]. – М. : Металлургия, 1976. – 416 с.
5. *Исследования процесса осадки с кручением тонкого слоя* / О. А. Ганаго, В. Н. Субич, Б. А. Степанов [и др.] // *Изв. вузов. Машиностроение.* – 1980. – № 6. – С. 110–113.

6. Чигиринский В. В. Развитие теории прокатки, разработка технологии и внедрение тонкостенных профилей сниженной металлоемкости в промышленность : дис. доктора техн. наук : 05.03.05 / Чигиринский В. В. – Днепропетровск, 1999. – 332 с.

7. Чекмарев А. П. Экспериментальное исследование контактных напряжений при прокатке с неравномерным обжатием / А. П. Чекмарев, А. А. Динник, Л. Е. Каптуров // Обработка металлов давлением : научные труды ДМетИ. – 1971. – Вып. 56. – С. 154–158.

8. Динник А. А. Определение продольных напряжений, вызванных различным обжатием по ширине / А. А. Динник, В. В. Чигиринский // Аннотации в РЖ «Металлургия». – 1978. – № 9. – С. 6.

9. Чигиринский В. В. Исследование и совершенствование технологического процесса прокатки сложных несимметричных профилей : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.16.05 / Чигиринский В. В. – Днепропетровск, 1979. – 20 с.

10. Кресанов Ю. С. Исследование и разработка процесса продольной периодической прокатки заготовок лопаток авиационных газотурбинных двигателей: дис. кандидата техн. наук : 05.07.04 / Кресанов Ю. С. – Харьков, 1979. – 207 с.

## REFERENES

1. Proizvodstvo vysokojeffektivnogo metalloprokata / V. V. Chigirinskij, V. L. Mazur, G. I. Legotkin [i dr.]. – Dnepropetrovsk : «Dnipro-VAL», 2006. – 265 s. (s il.).

2. Chigirinskij V. V. Jeksperimental'noe issledovanie momentov sil pri stremlenii polosy k iskrivleniju na vhode v ochag deformacii i vyhode iz nego / V. V. Chigirinskij // Izv. vuzov. Chernaja metallurgija. – 1983. – № 11. – S. 85–88.

3. Proizvodstvo tonkostennogo prokata special'nogo naznachenija / V. V. Chigirinskij, Ju. S. Kresanov, A. Ja. Kachan [i dr.] – Zaporozh'e : «VALPIS», 2014. – 295 s. (s il.).

4. Kontaktnoe trenie v processah obrabotki metallov davleniem / A. N. Levanov, V. L. Kolmogorov, S. P. Burkin [i dr.] – M. : Metallurgija, 1976. – 416 s.

5. Issledovaniya processa osadki s krucheniem tonkogo sloja / O. A. Ganago, V. N. Subich, B. A. Stepanov [i dr.] // Izv. vuzov. Mashinostroenie. – 1980. – № 6. – S. 110–113.

6. Chigirinskij V. V. Razvitie teorii prokatki, razrabotka tehnologii i vnedrenie tonkostennyh profilej snizhennoj metalloemкости v promyshlennost' : dis. doktora tehn. nauk: 05.03.05 / Chigirinskij V. V. – Dnepropetrovsk, 1999. – 332 s.

7. Chekmarev A. P. Jeksperimental'noe issledovanie kontaktnyh naprjazhenij pri prokatke s neravnomernym obzhatiem / A. P. Chekmarev, A. A. Dinnik, L. E. Kapurov // Obrabotka metallov davleniem : nauchnye trudy DMetI. – 1971. – Вып. 56. – S. 154–158.

8. Dinnik A. A. Opredelenie prodol'nyh naprjazhenij, vyzvannyh razlichnym obzhatiem po shirine / A. A. Dinnik, V. V. Chigirinskij // Annotacii v RZh «Metallurgija». – 1978. – № 9. – S. 6.

9. Chigirinskij V. V. Issledovanie i sovershenstvovanie tehnologicheskogo processa prokatki slozhnyh nesimmetrichnyh profilej : avtoref. dis. kand. tehn. nauk : 05.16.05 / Chigirinskij V. V. – Dnepropetrovsk, 1979. – 20 s.

10. Kresanov Ju. S. Issledovanie i razrabotka processa prodol'noj periodicheskoj prokatki zagotovok lopatok aviacionnyh gazoturbinnnyh dvigatelej: dis. kandidata tehn. nauk : 05.07.04 / Kresanov Ju. S. – Har'kov, 1979. – 207 s.

Леготкин Г. И. – председатель наблюдательного совета КрКЗ;

Слепынин А. Г. – зам. председателя наблюдательного совета КрКЗ;

Драгобецкий В.В. – д-р техн. наук, проф. КрНУ им. М. Остроградского.

КрКЗ – Кременчугский колесный завод, г. Кременчуг;

КрНУ им. М. Остроградского – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг.

E-mail: valerij@zntu.edu.ua

Статья поступила в редакцию 08.09.2015 г.