

В.П. СОКУРЄНКО, д.т.н., позаштатний науковий співробітник ДП "НІТІ"

Трубний інститут ім. Я.Ю. Осади, м. Дніпро

П.В. ДРОЖЖА, к.т.н., доцент, pwdrozhzha@gmail.com

К.М. БИКОВЕЦЬ, студентка, 44-08@i.ua

НФ НМетАУ, м. Нікополь

Дослідження алгоритму зміни поперечної різностінності на трубопрокатному агрегаті з автоматичним станом

Високі вимоги до точності товщини стінки обумовлюються не тільки необхідністю забезпечення надійності і працездатності обладнання, а й тенденцією до постійного зниження його металоемності. При цьому забезпечити дотримання даного параметра точності труби найбільш складно. Поперечну різностінність можна представити у вигляді двох складових: ексцентричної і симетричної. У статті представлено дослідження зміни ексцентричної складової поперечної різностінності труб, прокатаних на ТПА -350 з автоматичним станом.

The high requirements as to accuracy of the wall thickness are due not only to necessity of assuring the reliability and serviceability of equipment, but also to the trend towards the continuous decrease of metal capacity. In this situation assuring observing of the given parameter is the most difficult affair. The cross wall thickness deviation can be presented in the form of two components: eccentric and symmetric deviation. The paper presents an investigation of the change in the eccentric component of the transverse difference in pipes rolled on TPA -350 with an automatic mill.

Вступ

Трубопрокатні агрегати з автоматичним станом відносяться до числа найбільш розповсюджених серед ТПА гарячої прокатки труб, й на теперішній час на цих агрегатах виробляється до 30% всієї трубопрокатної продукції [1]. Сучасні тенденції розвитку теорії та технологій трубного виробництва заключаються в задоволенні попиту на трубопрокатну продукцію при забезпеченні максимального ступеню енерго- та металозбереження [2, 3]. При цьому питання підвищення точності труб взагалі, й мінімального рівня різностінності зокрема, являються одними з найбільш актуальних, як такі, які напряму впливають на економію металу, як при переробці, так і при експлуатації трубної продукції [4].

Виділення невирішеного

При гарячій прокатці труб на величину поперечної різностінності впливає велика кількість факторів, й для можливості моделювання процесу зміни величини різностінності під час переробки, дослідження впливу різних факторів на величину різностінності на теперішній час являються актуальними. Один з недостатньо освітлених питань — дослідження зміни величини екс-

центричної різностінності поперечного перерізу труб, під час її прокатки на ТПА з автоматичним станом.

Аналіз досліджень

Переробка труби на ТПА з автоматичним станом здійснюється на одному (або двох послідовно) станах поперечно-гвинтової прокатки, автоматичному стані (повздовжня прокатка), розкатному стані (поперечно-гвинтова прокатка), калібровочному або редуційному стані безперервної прокатки без оправки (рис. 1).

Формування товщини стінки послідовно проходить в наступному порядку: суцільна заготовка прошивається в прошивному стані, й тут трубі (гільзі) надається переважно ексцентрична різностінність поперечного перерізу [4, 5, 7, 11]. Ексцентриситет товщини стінки гільзи в основному обумовлений ненормальними умовами процесу при поперечно-гвинтової прокатки, такими, як складні рухи оправки в осередку деформації (викликані дією на неї металу, що прошивається і вібраціями стрижня), знос робочих валків і лінійок (або іншого інструменту, що обмежує овалізацію гільзи), аномальний перепад температур в заготовці, якість торців заготовки та ін. [7—9, 11]. Приклад пронумерованої формули наведений нижче.

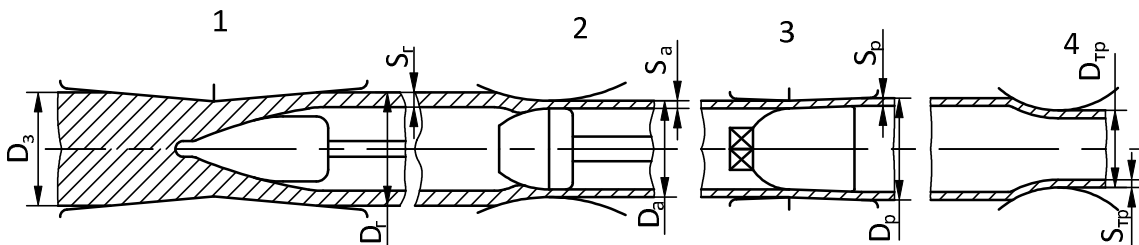


Рис. 1. Загальна схема формозміни труби на ТПА з автоматичним станом (з одним прошивним станом): 1 — прошивка заготовки в товстостінну трубу на стані поперечно-гвинтової, 2 — прокатка гільзи в чорнову трубу в автоматичному стані повздовжньої прокатки; 3 — розкатка чорнової труби в розкатному стані поперечно-гвинтової прокатки; 4 — калібровка або редукування труби в безперервному стані [6]

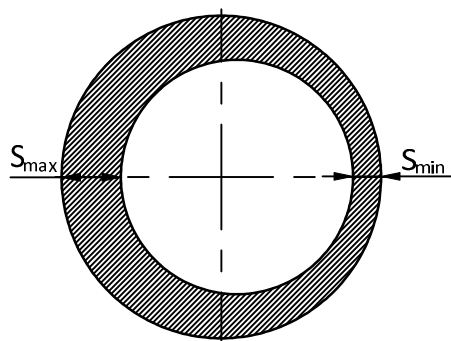


Рис. 2. Зовнішній вигляд труби, що має ексцентричну різностінність [9, 11]

Далі труба прокатується в стані повздовжньої прокатки (автоматичному стані). Рівчак калібру автоматичного стану має круглу з випуском по прямій (або по радіусу) форму. Тому прокатка проходить в два проходи з повертанням труби на передній стіл та кантовкою (або прокаткою в двох послідовно розташованих клітках на стані типу «Тандем», теж з кантовкою). Після кантовки стовщення, що утворилися в випусках калібру дещо розкатуються, але труба набуває деякої величини симетричної різностінності (рис. 3). Після прокатки в розкатному стані, вісь симетрії різностінності дещо зміщується [7, 10].

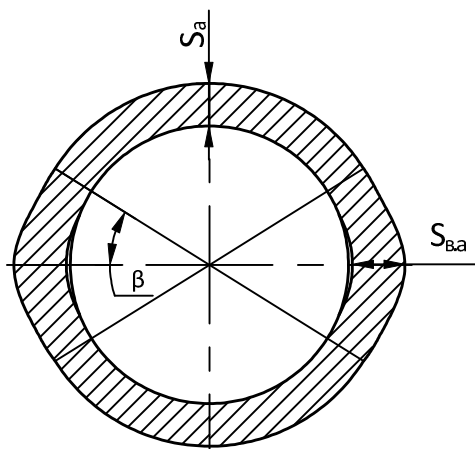


Рис. 3. Формування симетричної різностінності поперечного перерізу труби [7]: β — кут випуску поперечного перерізу рівчака калібру; S_a — товщина стінки в вершині калібру; S_{va} — товщина стінки в випусках калібру

А.П. Чекмарьов та Я.Л. Ваткін [11, 12] в результаті дослідження зміни величини різностінності труби під час її прокатки на станах, що входять до складу ТПА з автоматичним станом, зробили наступні висновки (рис. 4): різностінність труб, після першого проходу на автоматичному стані значно вища за різностінність гільз (52—56%, зрівняно з 16—20%); після другого проходу різностінність зменшується до 22—24%; труби, прокатані в обкатному стані, мають різностінність в межах 12—14%; в каліброчному стані різностінність труби підвищується до 15—18%.

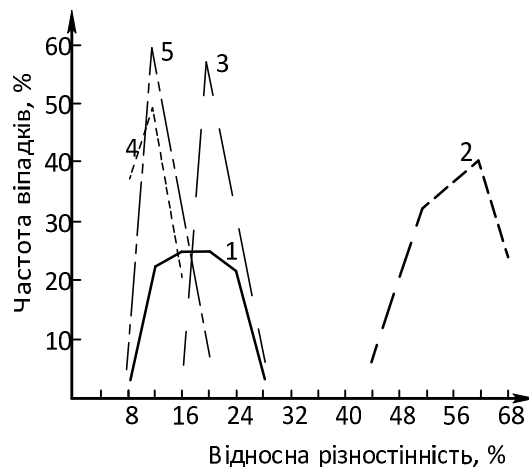


Рис. 4. Зміна поперечної різностінності по стадіям технологічної переробки труб на ТПА з автоматичним станом [11]: 1 — гільза; 2 — труба після першого проходу на автоматичному стані; 3 — труба після другого проходу на автоматичному стані; 4 — труба після обкатного стану; 5 — готова труба

Ще одна з особливостей труб з товщиною стінки до 8 мм, прокатаних на ТПА з автоматичним станом, складається в тому, що трубі надається значна величина повздовжньої різностінності (рис. 5) [11, 13].

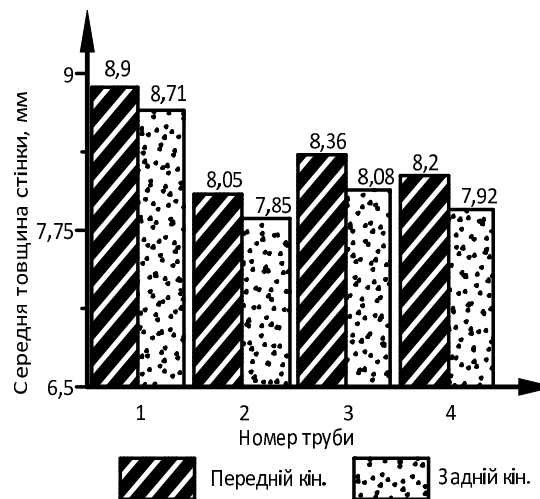


Рис. 5. Середня товщина переднього та заднього кінців труби розміром 114x8 мм зі сталі 20 (ТПА-140) [14]

В процесі прошивки суцільної заготовки в полу гільзу, з-за різної швидкості охолодження не прошитої частини заготовки, та вже прошитої частини гільзи (в якій, до того ж, знаходиться стрижень оправки, що підлягає охолодженню) між переднім та заднім кінцями гільзи спостерігається значний перепад температури ($\Delta t_{np} = 35 \dots 105^\circ\text{C}$, рис. 6) [13, 15]. Саме це й являється основною причиною повздовжньої різностінності труб, вироблених на ТПА з автоматстаном.

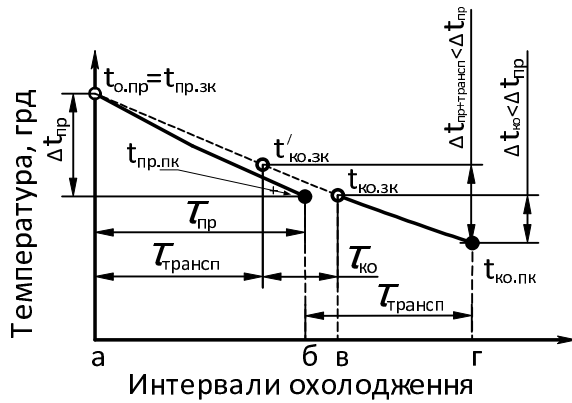


Рис. 6. Температура металу в різні моменти технологічного процесу: а, б — моменти виходу заднього (зк) та переднього (пк) кінців з прошивного стану (*пр*); в, г — моменти входу заднього та переднього кінців в короткооправочний стан (*ко*); $t'_{ко,зк}$ — температура заднього кінця труби в момент входу переднього в короткооправочний стан [14—15]

Результати досліджень

Для дослідження характеру зміни різностінності підчас прокатки труби на ТП-350 з автоматстаном вибрано трубу розміром 219x6 мм зі сталі 20. В якості заготовки, для даної труби використовується суцільна кругла заготовка діаметром 170 міліметрів. Підчас прокатки

труби на агрегаті від переднього та заднього кінців після другого прошивного, автоматичного, розкатного, та калібрувального станів відбиралися зразки. Зразки підлягали обміру товщини стінки в 8-ми (після 2-го прошивного) та в 10-ти (після інших станів) крапках поперечного перерізу.

Обміри зразків від гільзи, відібраної після другого прошивного стану показали, що діаметр трубі коливався в межах 225—225,8 мм. Результати обмірів товщини стінки показано в табл. 1.

Як видно з діаграм (рис. 7), різностінність має суто ексцентричний характер.

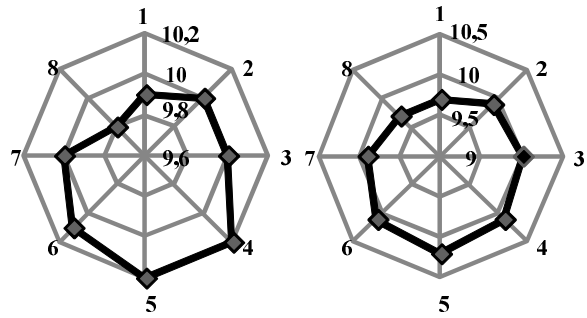


Рис. 7. Кругова діаграма результатів замірів товщини стінки гільзи після другого прошивного стану

Таблиця 1. Результати обмірів товщини стінки та величина різностінності гільзи після 2-го прошивного стану

Передній кінець												
Товщина стінки в перерізах								Scp	Smax	Smin	ΔS,	
1	2	3	4	5	6	7	8				мм	%
9,9	10	10	10,2	10,2	10,1	10	9,8	10,03	10,2	9,8	0,4	3,99
Задній кінець												
Товщина стінки в перерізах								Scp	Smax	Smin	ΔS,	
1	2	3	4	5	6	7	8				мм	%
9,7	9,9	10	10,1	10,2	10,1	9,9	9,7	9,95	10,2	9,7	0,5	5,03

Після другого проходу в автоматичному стані від 8-ми труб, з переднього та заднього кінців відібрано зразки. Результати обмірів товщини стінки показано в табл. 2.

Поперечний переріз труб після автоматичного стану має характерний симетричний вигляд (рис. 8). Зрівняння величин середньої товщини стінки переднього та заднього кінців труб показує, що передній кінець має більшу товщину стінки, ніж задній (див табл. 2).

Після прокатки труб в розкатному стані зразки труб теж було відібрано від 8-ми труб з обох кінців. Діаметр зразків коливався в межах 230,1—230,7 мм. В таблиці 3 показано результати замірів товщини стінки зразків.

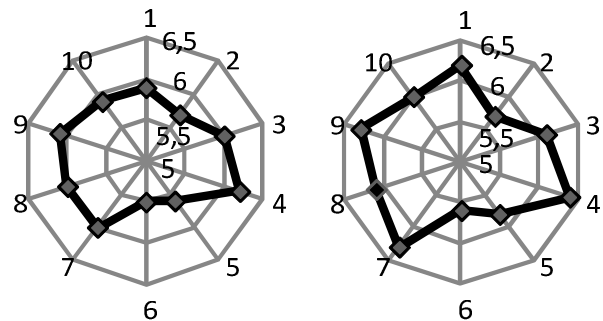


Рис. 8. Характерний вигляд кругових діаграм результатів замірів товщини стінки чорнової труби (труби-заготовки, після другого проходу в автоматичному стані)

Таблиця 2. Результати обмірів товщини стінки та величина різностінності труби після прокатки в автоматичному стані

№тр	Передній кінець														
	Товщина стінки в перепрізах										Scp	Smax	Smin	ΔS,	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				мм	%
1	5,9	5,7	6	6,2	5,6	5,5	6	6	6,1	5,9	5,89	6,2	5,5	0,7	11,88
2	6,2	5,7	6,1	6,4	5,8	5,6	6,3	6,1	6,3	6	6,05	6,4	5,6	0,8	13,22
3	6,4	5,9	6,2	6,6	5,9	5,9	6,3	6,1	6,4	6,2	6,19	6,6	5,9	0,7	11,31
4	6,7	6,5	6,5	6,7	6,3	6,1	6,6	6,3	6,4	6,6	6,47	6,7	6,1	0,6	9,27
5	6,3	6,4	6,7	6,6	6,1	6,4	6,5	6,6	6,5	6,6	6,47	6,7	6,1	0,6	9,27
6	6,1	6,2	6,4	6,2	6,1	5,8	6,3	6,4	6	6,4	6,19	6,4	5,8	0,6	9,69
7	6	5,9	6,2	6	5,9	5,6	6,1	6	5,8	6,2	5,97	6,2	5,6	0,6	10,05
8	5,8	5,6	6,1	6,1	5,7	5,6	6	5,7	5,6	5,9	5,81	6,1	5,6	0,5	8,61
№тр	Задній кінець														
	Товщина стінки в перепрізах										Scp	Smax	Smin	ΔS,	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				мм	%
1	5,7	5,4	5,8	6,1	5,5	5,4	5,9	5,8	6	5,9	5,75	6,1	5,4	0,7	12,17
2	5,8	5,6	6	6,2	5,7	5,5	6,1	5,8	6,1	5,9	5,87	6,2	5,5	0,7	11,93
3	6	5,7	6,3	6,2	5,7	5,5	6,2	6	6,4	6,1	6,01	6,4	5,5	0,9	14,98
4	6,4	5,9	6,4	6,4	5,9	6,1	6,4	6,2	6,6	6,5	6,28	6,6	5,9	0,7	11,15
5	6,4	6,2	6,2	6,3	6,2	5,9	6,2	6,4	6,2	6,4	6,24	6,4	5,9	0,5	8,01
6	5,9	5,7	6,1	6	5,8	5,5	5,9	6,1	6	5,9	5,89	6,1	5,5	0,6	10,19
7	5,8	5,5	5,9	5,7	5,6	5,5	5,7	5,6	5,9	5,6	5,68	5,9	5,5	0,4	7,04

Таблиця 3. Результати обмірів товщини стінки та величина різностінності труби після прокатки в розкатному стані

№тр	Передній кінець														
	Товщина стінки в перепрізах										Scp	Smax	Smin	ΔS,	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				мм	%
1	5,8	5,6	6,1	6,1	5,5	5,5	6	5,9	6	5,8	5,83	6,1	5,5	0,6	10,29
2	6,1	5,7	6	6,2	5,7	5,5	6,2	6,1	6,2	6	5,97	6,2	5,5	0,7	11,73
3	6,3	5,9	6,1	6,4	5,9	5,7	6,3	6,3	6,3	6,2	6,14	6,4	5,7	0,7	11,40
4	6,7	6,3	6,2	6,6	6,2	6,3	6,5	6,5	6,4	6,4	6,41	6,7	6,2	0,5	7,80
5	6,4	6,3	6,4	6,7	6,1	6,2	6,5	6,6	6,4	6,5	6,41	6,7	6,1	0,6	9,36
6	6,2	6,2	6,7	6,5	6	5,9	6,4	6,4	6,1	6,3	6,27	6,7	5,9	0,8	12,76
7	5,9	5,9	6,5	6,3	5,8	5,9	6,2	6,1	5,9	6	6,05	6,5	5,8	0,7	11,57
8	5,8	5,7	6,2	6,1	5,7	5,7	6	5,8	5,5	5,8	5,83	6,2	5,5	0,7	12,01
№тр	Задній кінець														
	Товщина стінки в перепрізах										Scp	Smax	Smin	ΔS,	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				мм	%
1	5,7	5,9	6	6	5,4	5,5	5,9	5,8	6	6,4	5,86	6,4	5,4	1	17,06
2	5,7	5,6	6	6,1	5,6	5,6	6,2	5,9	6,1	6,4	5,92	6,4	5,6	0,8	13,51
3	5,9	5,9	6,1	6,3	5,8	5,6	6,3	6,2	6,3	6,2	6,06	6,3	5,6	0,7	11,55
4	6,2	6,2	6,3	6,4	5,9	6,2	6,4	6,4	6,3	6	6,23	6,4	5,9	0,5	8,03
5	6,4	6,1	6,5	6,4	6,1	6,1	6,5	6,5	6,2	5,9	6,27	6,5	5,9	0,6	9,57
6	6,2	6,1	6,4	6,2	6,1	5,9	6,4	6,5	6	5,8	6,16	6,5	5,8	0,7	11,36
7	5,9	5,9	6,2	6,1	6	5,8	6,1	6,3	5,7	6	6	6,3	5,7	0,6	10,00
8	5,7	5,6	6,1	5,9	5,7	5,7	6	5,4	5,4	5,7	5,72	6,1	5,4	0,7	12,24

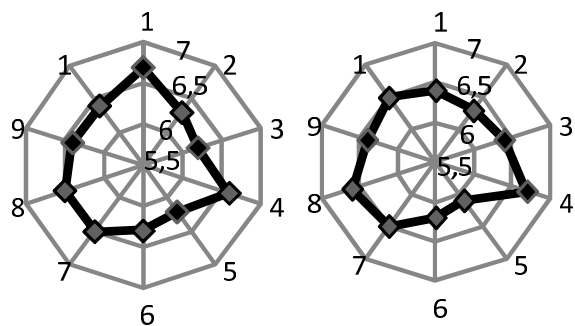


Рис. 9. Характерний вигляд кругових діаграм результатів замірів товщини стінки труби-заготовки, після обкатного стану

Типовий розподіл товщини стінки в поперечному перерізі показано на рис. 9. Аналізуючи ці діаграми можливо зробити висновок, що характерна для автоматичного стану симетрична різностінність після поперечно-гвинтової прокатки в повній мірі не розкатується.

В табл. 4 показано результати обміру готових труб (діаметр коливався в межах 218,95—219,7 мм), на рис. 10 показано характерний вигляд кругових діаграм результатів замірів товщини стінки труби після калібрувального стану. З діаграм видно, що симетричний характер різностінності зостанеться й після калібрування труби в безперервному стані повздовжньої прокатки.

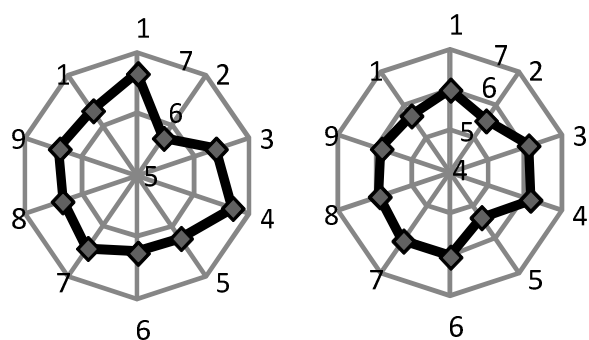


Рис. 10. Характерний вигляд кругових діаграм результатів замірів товщини стінки труби після калібрувального стану

Поперечну різностінність можна представити у вигляді двох складових: ексцентричної і симетричної різностінності. Щоб виділити ці частини, скористаємося підходом, викладеним в [11].

Сутність даного методу полягає в наступному. На першому етапі необхідно впорядкувати експериментальні дані вимірів товщини стінки труби в поперечному перерізі наступним чином. Вибираємо в даному поперечному перерізі найбільше значення товщини стінки, якому присвоюємо індекс «1». Решта значення даної вибірки нумеруємо по порядку зліва направо.

Таблиця. 4. Результати обмірів товщини стінки та величина різностінності труби після прокатки в калібрувальному стані

№тр	Передній кінець														
	Товщина стінки в перепрізах										Scp	Smax	Smin	ΔS,	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				мм	%
1	5,85	6,25	6	6,05	5,45	5,55	6,1	5,75	5,95	5,95	5,89	6,25	5,45	0,8	13,58
2	6,15	6,35	6,15	6,15	5,6	5,6	6,25	5,85	6,15	6,15	6,04	6,35	5,6	0,75	12,42
3	6,2	6,2	6,25	6,35	5,6	5,6	6,4	5,9	6,25	6,25	6,1	6,4	5,6	0,8	13,11
4	6,45	5,95	6,35	6,5	6,05	6,05	6,55	6,2	6,25	6,45	6,28	6,55	5,95	0,6	9,55
5	6,65	5,75	6,4	6,7	6,25	6,25	6,45	6,35	6,4	6,3	6,35	6,7	5,75	0,95	14,96
6	6,4	5,7	6,55	6,65	6,05	6,05	6,4	6,55	6,35	6,25	6,295	6,65	5,7	0,95	15,09
7	6,25	5,65	6,5	6,45	5,9	5,9	6,15	6,35	5,85	6	6,1	6,5	5,65	0,85	13,93
8	6	5,6	6,2	6,15	5,75	5,75	6	6	5,55	5,85	5,885	6,2	5,55	0,65	11,05
№тр	Задній кінець														
	Товщина стінки в перепрізах										Scp	Smax	Smin	ΔS,	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				мм	%
1	6,35	5,25	5,85	6	5,75	6	6,3	5,6	6,35	5,9	5,935	6,35	5,25	1,1	18,53
2	6,25	5,3	5,9	6,05	5,5	6,15	6,25	5,75	6,2	5,85	5,92	6,25	5,3	0,95	16,05
3	6	5,55	6,1	6,15	5,35	6,05	6,05	5,9	5,85	5,7	5,87	6,15	5,35	0,8	13,63
4	5,85	5,7	6,25	6,45	5,6	5,95	5,9	6,05	5,65	5,95	5,935	6,45	5,6	0,85	14,32
5	5,7	5,95	6,15	6,5	5,7	5,7	5,75	6,25	5,45	6,05	5,92	6,5	5,45	1,05	17,74
6	5,7	6	6,05	6,25	5,95	5,65	5,85	6,4	5,75	6,25	5,985	6,4	5,65	0,75	12,53
7	5,75	5,9	5,9	6	6,05	5,6	5,95	6,25	5,9	6,3	5,96	6,3	5,6	0,7	11,74
8	5,85	5,75	5,8	5,9	6,15	5,45	6,1	5,95	6,25	6,2	5,94	6,25	5,45	0,8	13,47

Далі визначаємо середню товщину стінки труби S_{cp} в даному поперечному перерізі, ексцентриситет e , частку дисперсії σ_3^2 , обумовленої ексцентричною складовою різностінності, сумарну дисперсію товщини стінки σ_2^2 . Знаходимо частку a_3 , що вноситься в відхилен-

ня товщини стінки труби ексцентричністю, по формулі:

$$a_3 = \frac{\sigma_3^2}{\sigma_2^2} \quad (1)$$

Результати обробки експериментальних даних показані в на графіку (рис. 11).

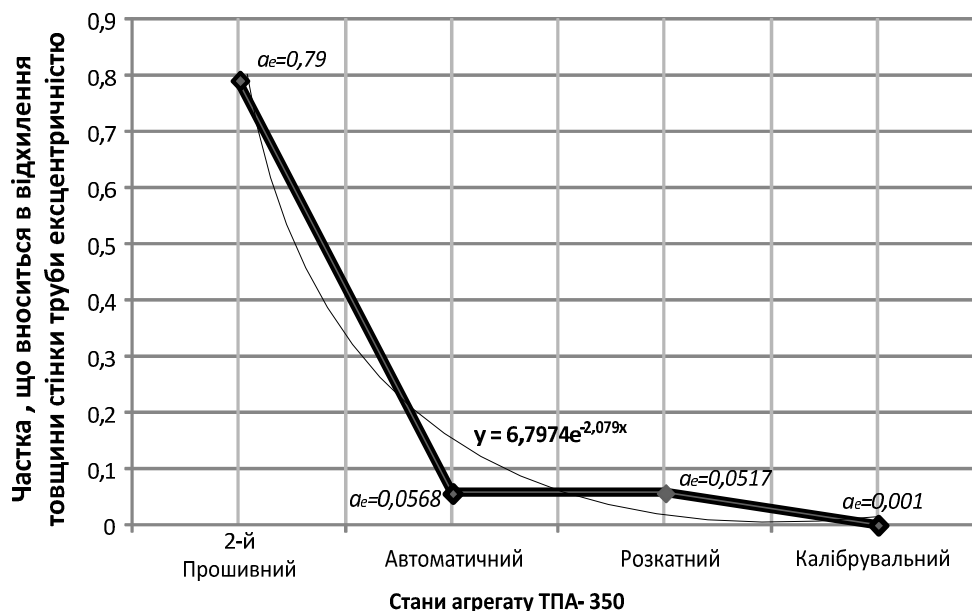


Рис. 11. Зміна частки різностінності, що вноситься в відхилення товщини стінки труби ексцентричністю

Висновки

Аналіз даних графіку (див. рис. 11) дозволяє зробити наступні висновки. Найбільшу частку різностінності, що обумовлена ексцентричною складовою мають гільзи (коливання в межах 0,7—0,9), прокатані в стані поперечно-гвинтової прокатки. Далі, в автоматичному стані (повздовжня прокатка на короткій оправці) доля ексцентричної різностінності значно зменшується (коливання в межах 0,055—0,057). Далі, після розкатного стану (поперечно-гвинтова прокатка), доля ексцентричної складової залишається майже на тому ж рівні (коливання в межах 0,048—0,066). Подальше зменшення a_3 спостерігається (незначні коливання навколо значення 0,0001) при калібруванні (стан безперервної повздовжньої прокатки). Зміну різностінності між першою та другою прошивками дослідити не вдалось. Знайдена лінія тренду дозволяє моделювати зміну ексцентричної складової величини поперечної різностінності з певною величиною похибки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Данченко В.Н. Технология трубного производства: Учебник для вузов / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев – М.: Интернет Инжиниринг, 2002. – 640с.
2. Г.А. Орлов, Разработка математических моделей и способов повышения точности и деформируемости труб при холодной прокатке. Автореферат дисертації на здобуття вченого ступеня канд. техн. наук, УПИ, 2005.
3. Kearns W.H. “Minimizing Wall Thickness Variation in Seamless Tubing,” The Fabricator / W.H. Kearns / [Электронный ресурс] Технічний журнал. – 2009, 28 серпня. URL: www.TheFabricator.com/TubePipeProduction/TubePipeProduction_Article.cfm?ID=678 (дата звернення: 23.11.2017).
4. Kara F. Effect of thickness variation on collapse pressure of seamless pipes / F. Kara, J. Navarro, R. L. Allwood // Ocean Engineering – 2010. – № 37 – С. 998–1006.
5. Crappsa J. Internal state variable plasticity-damage modeling of the copper tee-shaped tube hydroforming process Author links open overlay panel / J. Crappsa, E.B. Marinb, M.F. Horstemeyerab, R. Yassarc, P.T. Wang // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – № 13. – p. 1726–1737.
6. Коликов А.П. Машины и агрегаты трубного производства: Учебное пособие для вузов / А.П. Коликов, В.Б. Романенко, С.В. Самусев и др – М.: МИСИС, 1998. – 536 с.
7. Лимонченко Е. О. Статистичне дослідження різностінності труб, прокатаних на агрегаті з безперервним оправочним станом / Лимонченко Е.О., Дрожжа П.В., Пилипенко С.В. // Пластична деформація металів: Колективна монографія. – 2017. – С. 130–133. – ISBN 978-966-291-124-8.
8. W. Guo, R. Chen, and J. J. Jin, “Online eccentricity monitoring of seamless tubes in cross-roll piercing mill,” J. Manuf. Sci. Eng. 137 (2), 021007 (2015).

9. R. K. Pattanayak, P. Manogharan, K. Balasubramaniam, and P. Rajagopa «Low frequency axisymmetric longitudinal guided waves in eccentric annular cylinders» *J. Acoust. Soc. Am.* 137 (6), p. 3253–3262
10. Чуев А.А. Моделирование процесса продольной прокатки с целью повышения точности труб / А.А. Чуев // *Обработка материалов давлением*. – 2011. – № 3 (28) – С. 59 – 65.
11. Столетний М.Ф. Точность труб / М.Ф. Столетний, Е.Д. Клемперт – М.: Металлургия, 1975. – 239 с.
12. Чекмарев А.П. Основы прокатки труб в круглых калибрах / А.П. Чекмарев, Я.Л. Ваткин – М.: Металлургиздат, 1962. – 222 с.
13. А.А. Корсаков, Совершенствование технологии винтовой прокатки непрерывнолитой заготовки с целью уменьшения диаметра черновой трубы. Автореферат дисертації на здобуття вченого ступеня канд. техн. наук, ЮГУ, 2015.
14. Ханин М.И. Режимы прошивки, обеспечивающие снижение продольной разностенности труб на агрегатах с короткооправочными станами / М.И. Ханин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 2. – С. 49 – 50.
15. Ханин М.И. Технология прокатки труб повышенной точности на агрегате с автоматстаном с использованием нестационарных режимов деформации при прошивке / М.И. Ханин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 8–9. – С. 361 –369.

пост. 04.09.2017