

В.Е. Гончаров /к.т.н./, С.В. Закарлюка /к.т.н./, Е.А. Руденко /д.т.н./.
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВОЛНИСТОЙ ПОЛОСЫ ПРИ УПРУГОМ РАСТЯЖЕНИИ

Исследован метод физического моделирования волнистой полосы при ее упругом растяжении. Разработаны модели волнистой полосы с симметричным и несимметричным дефектом неплоскостности. На основе разработанных моделей получены экспериментальные зависимости параметров неплоскостности от величины натяжения для полос с заведомо известным законом распределения напряжений натяжения по ширине. Проведено сравнение известных теоретических зависимостей с полученными экспериментальными данными при упругом растяжении полос с симметричной и несимметричной волнистостью.

Ключевые слова: физическая модель волнистой полосы, упругое растяжение, параметры неплоскостности, экспериментальное исследование.

Постановка проблемы

Одним из важных показателей качества холоднокатаных полос является плоскостность. Для оценки величины неплоскостности и ее управления нужно более точно определять параметры этого дефекта. В процессе обработки на различных технологических участках полоса практически всегда подвергается различному уровню натяжения. В случае натяжения неплоской полосы в упругой области величина дефекта может уменьшаться и частично скрываться. Кроме того, натяжение неплоской полосы вызывает неравномерное распределение напряжений натяжения по ее ширине (для волнистой полосы максимальные напряжения возникают в осевой зоне, для коробоватой – по кромкам) [1,2]. Это наиболее актуально при контроле неплоскостности [3] и обработке холоднокатаной полосы с относительно низким уровнем натяжения – в непрерывных агрегатах отжига, нанесения покрытий, порезки и др. [4,5].

Анализ последних исследований и публикаций

Известен ряд теоретических зависимостей параметров неплоскостности от натяжения полосы для различных законов распределения напряжений натяжения по ширине [6...8]. Однако, выполненных экспериментальных исследований в этом направлении не достаточно. В работе [9] проведено экспериментальное исследование для одной величины амплитуды только симметричной волнистости при неизвестном законе распределения напряжений по ширине полосы.

Для установления связи параметров неплоскостности с распределением напряжений по ширине полосы посвящено достаточно много исследований, в том числе при холодной прокатке [10]. Однако, эти эксперименты выполнены для случаев нахождения полосы с полностью скрытым дефектом и не могут быть применены для анализа параметров неплоскостности с частично скрытым дефектом, то есть при обработке с относительно низким уровнем натяжения.

Отсутствие таких экспериментальных исследований вызвано рядом трудностей, в том числе и в лабораторных условиях. Для проведения экспериментальных исследований необходимо создание достаточно больших натяжений в стальной полосе, а также наличия натяжных устройств необходимой мощности. Кроме того, получить опытную стальную неплоскую полосу в лабораторных условиях с заведомо известным законом распределения напряжений натяжения по ширине весьма проблематично.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является получение экспериментальных данных при упругом растяжении волнистых полос в лабораторных условиях и сравнение их с некоторыми известными теоретическими зависимостями для симметричной и несимметричной неплоскостности на основе разработанной физической модели.

Основной материал исследования

Для экспериментального исследования влияния упругого натяжения на параметры неплоскостности были изготовлены модели волнистой

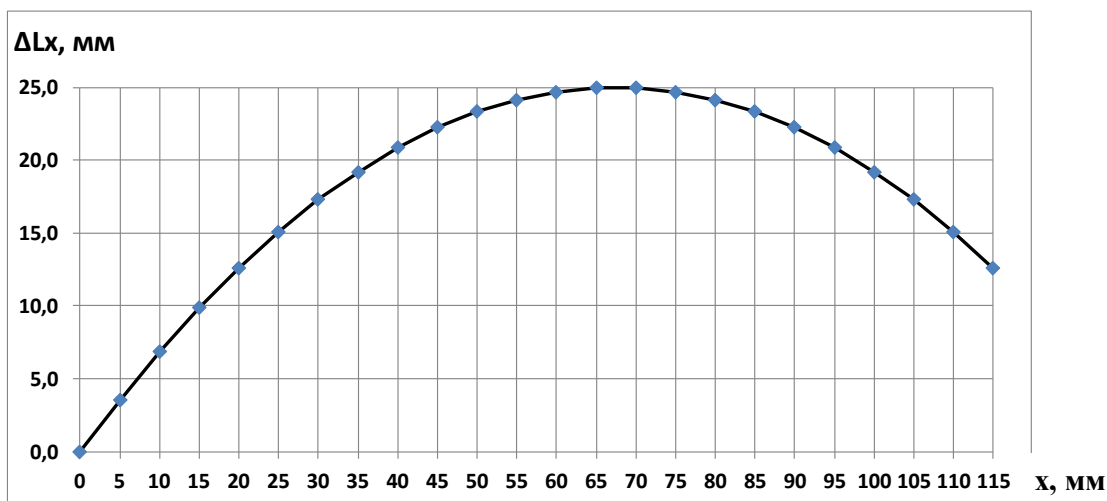


Рис. 1. Эпюра распределения неравномерности длин полосок по ширине полосы до их склеивания

полосы: две полосы с симметричной волнистостью и одна с несимметричной по методике, приведенной ниже.

В качестве материала для получения достаточно большой неравномерности деформаций при малой величине натяжения, легко создаваемой в лабораторных условиях, в заведомо упругой области деформаций и напряжений была выбрана резина. Выбор в качестве материала резины обеспечивал более легкое фиксирование результатов обычными измерительными приборами.

Для получения неплоской полосы, ее разрезали вдоль оси на параллельные полоски шириной 5 мм, которые растягивали по определённому закону и фиксировали. Затем полоски склеивали между собой и разгружали. После разгрузки полосы становились волнистыми из-за разной длины склеенных полосок. Величина волнистости зависела от абсолютной неравномерности и закона распределения длин полосок по ширине полосы.

Для получения симметричной волнистости полоски растягивали по параболическому закону в виде:

$$\Delta\mu_x = \Delta\mu_{\max} \left[1 - \frac{4}{B^2} \left(x - \frac{B}{2} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

где $\Delta\mu_x$ – распределение неравномерности (разности) вытяжек по ширине полосы с координатой x ; $\Delta\mu_{\max}$ – максимальная неравномерность вытяжек между серединой и кромками полосы; B – ширина полосы.

Для получения несимметричной волнистости полоски растягивали по параболическому закону в виде:

$$\Delta\mu_x = \Delta\mu_{\max} \left[1 - \frac{4}{(B+l)^2} \left(x - \frac{B+l}{2} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где l – смещение оси эпюры распределения вытяжек по ширине полосы.

Базовая длина всех полосок шириной 5 мм до нагружения (L) составляла 250 мм.

Эпюра распределения неравномерности длин полосок до их склеивания по ширине модели полосы, с несимметричной волнистостью по формуле (2) приведена на рис. 1.

Модуль упругости резины (E) определяли для каждой модели экспериментальным путем.

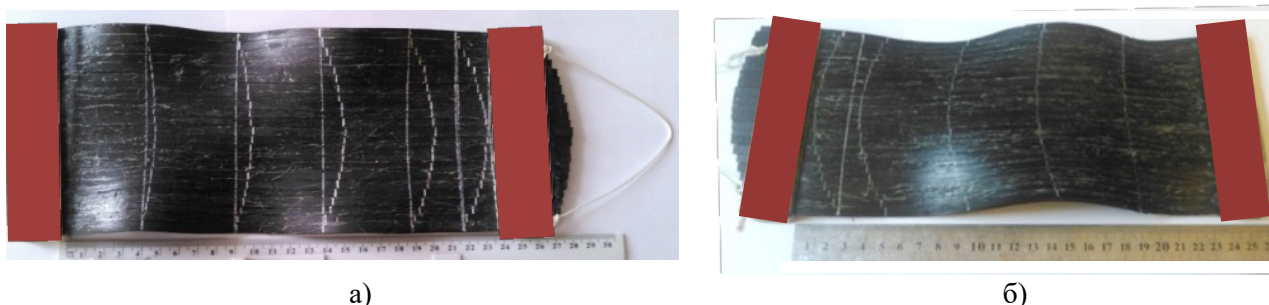


Рис. 2. Внешний вид моделей волнистых полос шириной 115 мм:
 а – с симметричной волнистостью;
 б – с несимметричной волнистостью (без натяжения, $T=0$)

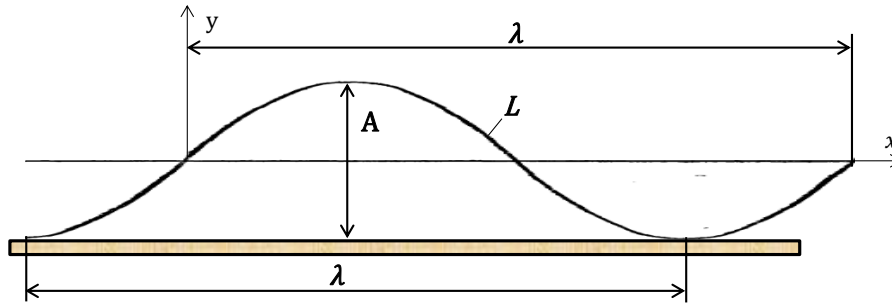


Рис. 3. Параметры неплоскостности кромки волнистой полосы для расчета по формуле (3)

Внешний вид одной из моделей полосы с симметричной волнистостью показан на рис. 2а, с несимметричной волнистостью – на рис. 2б.

Изготовленные модели неплоских полос в лабораторных условиях подвергали растяжению. Натяжение полосы (T) создавали с использованием грузов известной массы. Один край полосы закрепляли, второй растягивали с различной величиной натяжения до момента исчезновения волнистости, то есть когда полоса становилась видимо плоской (со скрытым дефектом). Аппроксимируя волнистость по кромке в виде синусоиды, величину амплитуды волнистости (A) рассчитывали с использованием зависимости, полученной в работах [11,12] в упрощенном виде (3) с достаточной точностью для инженерных расчетов.

$$A = \sqrt{\frac{4\lambda(L-\lambda)}{\pi^2}}, \quad (3)$$

Параметры неплоскостности опытной волнистой полосы при укладке на ровную поверхность показаны на рис. 3, где λ – период волнистости (соответственно для несимметричной волнистости: по левой кромке λ_1 , по правой - λ_2), мм; L – длина волны (дуго синусоиды в рамках ее периода) по кромке, (для несимметричной волнистости: по левой кромке L_1 , по правой – L_2 , мм.

Для удобства сравнительного анализа различных величин неплоскостности ее оценивали по приведенной амплитуде при одинаковой длине волны равной 1000 мм, то есть определяли $A_{пр} = \frac{A}{\lambda} \cdot 1000$, мм (соответственно для несимметричной волнистости: по левой кромке $A_{пр1}$, по правой – $A_{пр2}$).

Напряжение натяжения полосы определяли по формуле $\sigma_{уд} = \frac{T}{Bh}$, МПа.

Экспериментальное значение максимальных напряжений натяжения σ^*_{max} , при упругом растяжении волнистой полосы определяли по формуле $\sigma^*_{max} = \epsilon \cdot E$, (где ϵ – относительная деформация при упругом растяжении середины полосы, E – модуль упругости материала полосы), МПа.

Результаты экспериментальных исследований при растяжении моделей волнистых полос приведены в табл. 1...3.

Полученные экспериментальные данные сравнили с расчетными зависимостями, представленными в работе [6] для симметричной волнистости и в работе [7] для несимметричной волнистости. Величину амплитуды неплоскостности определяли по формуле:

$$A_{пр} = \sqrt{A_{пр0}^2 - \frac{4\lambda^2(\sigma_{max})}{\pi^2 a E}}, \quad (4)$$

Табл. 1. Результаты экспериментальных исследований при растяжении модели полосы с симметричной волнистостью (шириной $B=115$ мм, толщиной $h=2,1$ мм, модулем упругости $E=7,8$ МПа)

№ п/п	T , Н	$\sigma_{уд}$, МПа	λ , мм	L , мм	A , мм	$A_{пр}$, мм
1	0,0	0,0000	236	250	36,6	155,13
2	10,0	0,0414	238	250	34,0	143,02
3	21,0	0,0870	241	250	29,7	123,09
4	32,0	0,1325	243	250	26,3	108,11
5	41,0	0,1698	245	250	22,3	90,99
6	55,0	0,2277	248	250	14,2	57,20
7	65,0	0,2692	249	250	10,1	40,36
8	70,0	0,2899	250	250	0,0	0,00

Табл. 2. Результаты экспериментальных исследований при растяжении модели полосы с симметричной неплоскостью (шириной $B=145$ мм, толщиной $h=2,1$ мм, модулем упругости $E=7,8$ МПа)

№ п/п	$T, Н$	$\sigma_{уд}, МПа$	$\lambda, мм$	$L, мм$	$A, мм$	$A_{пр}, мм$
1	0,0	0,0000	216,0	250	54,6	252,70
2	14,0	0,0460	218,0	250	53,2	244,03
3	35,0	0,1149	222,0	250	50,2	226,21
4	54,0	0,1773	225,0	250	47,8	212,31
5	72,0	0,2365	227,0	250	46,0	202,75
6	100,0	0,3284	232,0	250	41,2	177,42
7	128,0	0,4204	238,0	250	34,0	143,02
8	156,0	0,5123	242,0	250	28,0	115,81
9	177,0	0,5813	245,0	250	22,3	90,99
10	200,0	0,6568	247,0	250	17,3	70,20
11	215,0	0,7061	248,5	250	12,3	49,49
12	225,0	0,7389	249,0	250	10,1	40,36
13	240,0	0,7882	250,0	250	0,0	0,00

Табл. 3. Результаты экспериментальных исследований при растяжении модели полосы с несимметричной волнистостью (шириной $B=115$ мм, толщиной $h=3,3$ мм, модулем упругости $E=7,0$ МПа)

№ п/п	$T, Н$	$\sigma_{уд}, МПа$	$\lambda 1, мм$	$L1, мм$	$A1, мм$	$A_{пр1}, мм/м$	$\lambda 2, мм$	$L2, мм$	$A2, мм$	$A_{пр2}, мм/м$	ϵ	$\sigma^*_{max}, МПа$
1	0,0	0,0	234	241	25,8	110,16	234	250	39,0	166,55	0,0	0,0
2	10,0	0,0264	235	241	23,9	101,78	235	250	37,8	160,92	0,0043	0,0299
3	20,0	0,0527	236,5	241	20,8	87,86	236,5	250	36,0	152,18	0,0107	0,0748
4	30,0	0,0791	238	241	17,0	71,51	238	250	34,0	143,02	0,0171	0,1197
5	40,0	0,1054	239	241	13,9	58,27	239	250	32,7	136,65	0,0214	0,1496
6	50,0	0,1318	240	241	9,9	41,11	240	250	31,2	130,02	0,0256	0,1795
7	55,0	0,1449	241	241	0,0	0,0	241	250	29,7	123,09	0,0299	0,2094
8	70,0	0,1845					243	250	26,3	108,11	0,0385	0,2692
9	80,0	0,2108					244	250	24,4	99,88	0,0427	0,2991
10	90,0	0,2372					245	250	22,3	90,99	0,0470	0,3291
11	100,0	0,2635					246	250	20,0	81,22	0,0513	0,3590
12	120,0	0,3162					248	250	14,2	57,20	0,0598	0,4188
13	130,0	0,3426					249	250	10,1	40,36	0,0641	0,4487
14	140,0	0,3689					250	250	0,0	0,0	0,0684	0,4786

где $A_{пр0}$ – величина приведенной амплитуды исходной волнистости до растяжения полосы, то есть при $T=0$;

a – коэффициент, учитывающий материальную связь участков по ширине полос ($a \approx 1$);

σ_{max} – максимальные напряжения натяжения, возникающие при растяжении волнистой полосы (в средней части полосы) рассчитывали для симметричной волнистости по зависимости, представленной в работе [6] из формулы:

$$\sigma_{уд} = \frac{2(\sigma_{max})^{3/2}}{3\sqrt{\Delta\sigma}} \quad (5),$$

где $\Delta\sigma$ определяют из работы [6] в виде:

$$\Delta\sigma = E \left(\frac{A_0 \pi}{2\lambda_0} \right)^2 \quad (6),$$

для несимметричной неплоскости σ_{max} рассчитывали по зависимостям (7...9),

При $\sigma_{max} < \Delta\sigma_2$:

$$\sigma_{уд} = \frac{4(\sigma_{max})^{3/2}}{3(\sqrt{\Delta\sigma_1} + \sqrt{\Delta\sigma_2})} \quad (7).$$

При $\sigma_{\max} > \Delta\sigma_2$ (по левой кромке волнистость полностью скрыта, $A_{01} = 0$):

$$\sigma_{уд} = \frac{1}{\sqrt{\Delta\sigma_1} + \sqrt{\Delta\sigma_2}} \left[\frac{2}{3} (\sigma_{\max})^3 + \sigma_{\max} \sqrt{\Delta\sigma_2 - \frac{(\Delta\sigma_2)^2}{3}} \right] \quad (8)$$

В формулах (7,8) $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2$ определяли по материалам работы [7] в виде:

$$\Delta\sigma_1 = E \left(\frac{A_{01}\pi}{2\lambda_{01}} \right)^2, \quad \Delta\sigma_2 = E \left(\frac{A_{02}\pi}{2\lambda_{02}} \right)^2, \quad (9)$$

где A_{01}, λ_{01} – амплитуда и период волнистости по левой кромке полосы до приложения натяжения, A_{02}, λ_{02} – амплитуда и период волнистости по правой кромке полосы до приложения натяжения. Для приведенной амплитуды волнистости принимаем $\lambda_{01} = \lambda_{02} = 1000$ мм.

Сравнение результатов эксперимента с теоретическими зависимостями по формулам (4...6) при упругом растяжении модели неплоской полосы с симметричной волнистостью приведено на рис. 4.

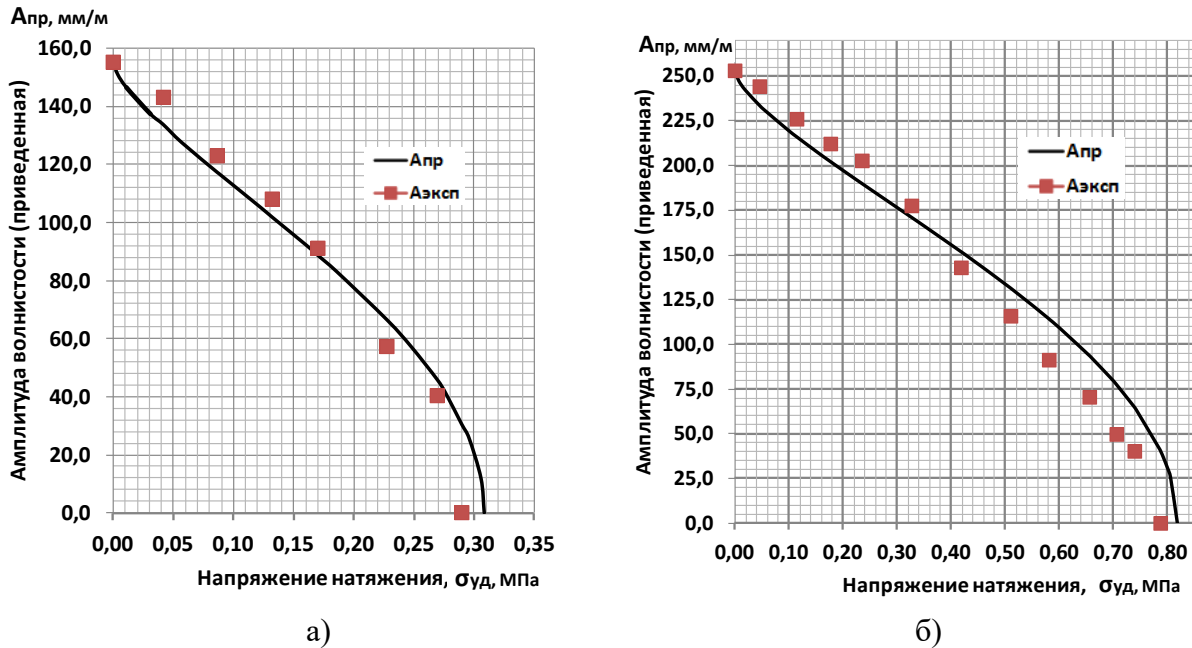


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими зависимостями, полученными в работе [6], при растяжении разработанной модели полосы с симметричной волнистостью: а – шириной 115 мм; б – шириной 145 мм

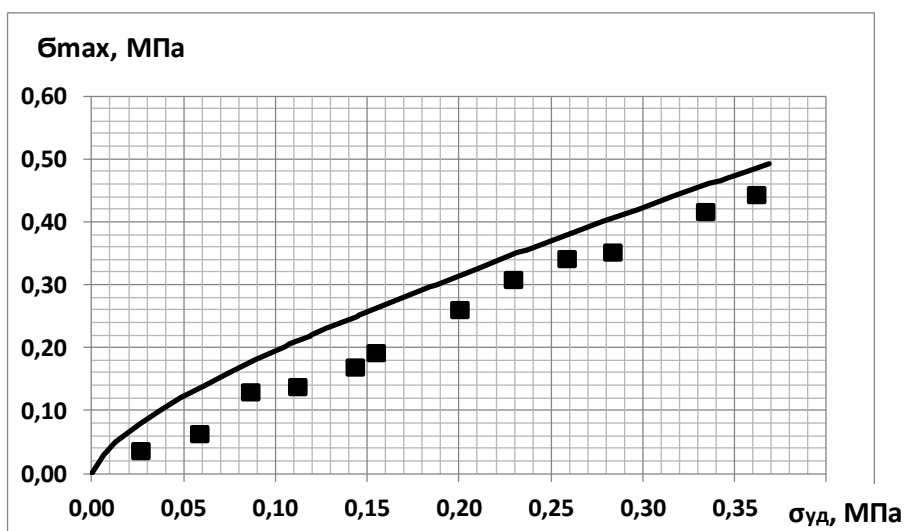


Рис. 5. Сравнение экспериментальных данных (■) с теоретическими зависимостями работы [7] для B_{max} (из формул 7...9) при растяжении разработанной модели полосы с несимметричной волнистостью

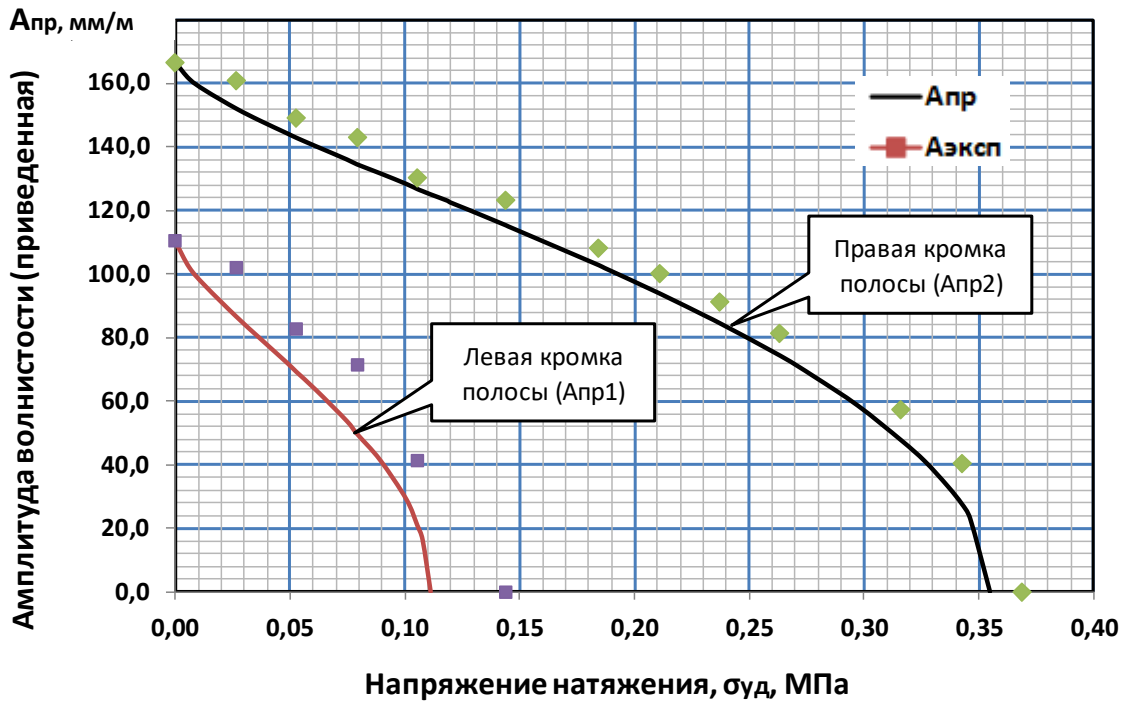


Рис. 6. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими зависимостями работы [7] для $A_{пр}$ с учетом (4) при растяжении модели полосы с несимметричной волнистостью

Сравнение результатов эксперимента с теоретическими зависимостями по формулам (4, 7...9) при упругом растяжении модели полосы с несимметричной волнистостью приведены на рис. 5, 6.

Сравнительный анализ теоретических кривых с экспериментальными данными при упругом растяжении полос с симметричной (рис. 3) и несимметричной волнистостью (рис. 4, 5) показал хорошую их сходимость. Кроме того, из рис. 4 видно, что максимальные напряжения натяжения $\sigma_{уд}$ по ширине полосы значительно превышают напряжения $\sigma_{уд}$ и это необходимо учитывать при назначении режимов натяжения при обработке, например, в непрерывных агрегатах отжига.

Наиболее характерными точками на графиках являются переходные состояния от неплоского к видимо плоскому состоянию (когда $A_{пр} = 0$). Этот переход происходит для различных полос при определенном напряжении натяжения $\sigma_{уд}$. Сравнение экспериментальных и теоретических данных $\sigma_{уд}$ при которых $A_{пр} = 0$, показало, что относительная ошибка для полос с симметричной волнистостью составляет 2...7%, для полосы с несимметричной волнистостью – 2...24%. Наименьшее расхождение экспериментальных и теоретических данных для полосы с несимметричной неплоскостью выявлено для правой кромки (с наибольшей волнистостью) – 2%. Наибольшее расхождение установ-

лено для полосы с несимметричной неплоскостью по кромке с меньшей величиной волнистости – 24%.

Выводы

1. Разработанная модель волнистой полосы позволяет в лабораторных условиях с достаточной точностью доступными способами исследовать напряженно-деформированное состояние при упругом растяжении с заведомо известным законом распределения деформаций (напряжений) по ширине полос.

2. Разработанная модель волнистой полосы может быть использована для адекватной проверки теоретических зависимостей при упругом растяжении неплоских полос. Расхождение некоторых экспериментальных данных с теоретическими зависимостями может быть связана с наличием остаточных напряжений в неплоской полосе.

3. Опыт данной работы может быть использован для разработки моделей различных видов неплоскости, в том числе коробоватости, несимметричных видов неплоскости для различных законов распределения напряжений по ширине полосы.

Список литературы

1. FEM Analysis of Rolling Pressure Along Strip Width in Cold Rolling Process / X. H. Liu, X. Shi, S. H. Li, J. Y. Xu, G. D. Wang // Steel Res. Int. – 2007, Vol.14, 22-26 p.

2. Dixon, A. E. A physical based method to predict spread and shape during flat rolling for real-time application / A. E. Dixon, W.Y. Yuen // *Steel Res. Int.* – 2008, Vol.79, 287-296 p.
3. Flatness control in plate rolling / T. Yazawa, T. Sasaki, H. Rurukawa, Y. Suyanagi // *In Proc. Int. Steel Rolling Conf., Chiba, Japan.* – 1998, 611-616 p.
4. Улучшение плоскостности полос электро-технических изотропных сталей. Исследование формирования плоскостности полос / А.И. Божков, С.Н. Ивлиев, С.В. Бахтин и др. // *Производство проката: Наука и технологии*, 2015, №2. – С. 3-10.
5. Божков, А.И. Формирование плоскостности полос при рекристаллизационном отжиге / А.И. Божков. – Липецк, 2019. – 67 с.
6. Анализ напряженно-деформированного состояния неплоских полос при растяжении / В.М. Клименко, В.М. Богатырев, С.В. Закарлюка и др. // *Известия вузов. Черная металлургия*, 1986, №10. – С. 54-57.
7. Закарлюка, С.В. Изменение параметров неплоскостности при упругом растяжении полос / С.В. Закарлюка, Ю.И. Юрченко, В.Е. Гончаров // В кн.: *Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр.: Магнитогорск, 2018. – Вып. 24. – С. 3-12.*
8. Упругое растяжение неплоских полос при синусоидальном законе распределения напряжений / Е.А. Руденко, С.В. Закарлюка, В.Е. Гончаров, и др. – *Физика и техника высоких давлений.* – 2020. – Том 30, №2. – С. 88-97.
9. Денисов, П.И. О влиянии натяжения при прокатке на результаты измерения формы полосы / П.И. Денисов, В.А. Некит, А.Г. Медведев // *Известия вузов. Черная металлургия*, 1985, №3. – С. 62-64.
10. Божков, А.И. Плоскостность тонколистового проката / А.И. Божков, В.П. Настич. – Москва: “СП ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ”, 1998. – С. 264.
11. Железнов, Ю.Д. Прокатка ровных листов и полос / Ю.Д. Железнов. - Москва: Металлургия, 1971. – С. 200.
12. Чмелев, А.А. Анализ решений, применяемых при контроле планшетности полос и листов / А.А. Чмелев, В.Л. Мазур // В кн.: *Применение лазерной технологии и контроль качества металлопродукции: тезисы докладов Уральского семинара: Магнитогорск, 1986. – С. 39-40.*

V.E. Goncharov /Cand. Sci. (Eng.), S.V. Zakarlyuka /Cand. Sci. (Eng.), E.A. Rudenko /Dr. Sci. (Eng.).

Donetsk National Technical University (Donetsk)

EXPERIMENTAL STUDY OF PHYSICAL MODELING OF WAVY STRIP UNDER ELASTIC TENSION

Background. Currently, the search for ways to improve the flatness control of thin strips is under way. Studies of the stress-strain state of non-planar strips, including their elastic tension, continue. Therefore, it is important to conduct experimental studies of changes in the flatness parameters during their tension and compare them with known dependencies.

Materials and/or methods. In this work, we developed a technique for making physical models of strips with symmetric and asymmetric waviness for research in laboratory conditions. Model specimens were made of different width, thickness and initial magnitude of waviness. Rubber, which most accurately reflects the elastic properties of flat strips in tension, was used as the simulated material.

Results. A technique was developed and models of strips with symmetric and asymmetric undulations, suitable for laboratory research of the stress-strain state under elastic tension, were made. Experimental data on changes in the parameters of flatness under tension of strip models with different types and levels of waviness have been obtained.

Conclusion. The developed models of wavy strips allow for investigation of the stress-strain state under elastic tension with a known law of distribution of deformations (stresses) along the strip width in laboratory conditions with a sufficient accuracy by the available methods. The developed model of a wavy strip can be used to adequately verify the theoretical dependencies in elastic tension of flat strips.

Keywords: physical model of wavy strip, elastic tension, parameters of flatness, experimental investigation.

Сведения об авторах

В.Е. Гончаров

SPIN-код: 6901-3973

Телефон: +38 (071)358-40-28

Эл. почта: goncharovv54@yandex.ru

С.В. Закарлюка

SPIN-код: 1491-8334

Телефон: +38 (071)395-06-40

Эл. почта: s-zak@mail.ru

Е.А. Руденко

SPIN-код: 3658-6185

Телефон: +38 (071)305-83-10

Эл. почта: q2w3erudenko@yandex.ru

Статья поступила 31.01.2022 г.

©В.Е. Гончаров, С.В. Закарлюка, Е.А. Руденко, 2022

Рецензент д.т.н., проф. А.В. Яковченко