

PACS: 89.20.Bb

Е.А. Руденко, С.В. Закарлюка, В.Е. Гончаров,  
Ю.И. Юрченко, С.А. Будаква

## УПРУГОЕ РАСТЯЖЕНИЕ НЕПЛОСКИХ ПОЛОС ПРИ СИНУСОИДАЛЬНОМ ЗАКОНЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Донецкий национальный технический университет

Статья поступила в редакцию 17 марта 2020 года

*Получены теоретические зависимости для синусоидального закона распределения напряжений, устанавливающие связь между напряжениями натяжения и параметрами несимметричной неплоскостности при упругом растяжении полос. В случае частичного скрывания дефекта в натянутой полосе эти зависимости позволяют более точно рассчитать максимальные напряжения и параметры неплоскостности и, соответственно, более правильно установить режимы ее обработки, снизить вероятность обрывности полос (например, в непрерывных агрегатах при прокатке, отжиге, цинковании, дрессировке и т.д.).*

**Ключевые слова:** полоса, волнистость, коробоватость, параметры несимметричной неплоскостности, напряжения натяжения, синусоидальный закон распределения напряжений по ширине, упругое растяжение

### Введение

В процессе обработки на различных технологических участках полоса практически всегда подвергается натяжению: упругому или упруго-пластическому, например, при правке растяжением [1]. В случае натяжения неплоской полосы в упругой области величина дефекта может частично скрываться. Кроме того, натяжение такой полосы вызывает неравномерное распределение напряжений натяжения по ее ширине (у волнистой полосы максимальные напряжения возникают по оси, у коробоватой – по кромкам) [2,3]. Для корректировки параметров неплоскостности при измерении и выбора режимов обработки полосы необходимо установить более точную зависимость параметров неплоскостности и максимальных напряжений натяжения от величины натяжения полосы. Это наиболее актуально при контроле неплоскостности [4] и обработке холоднокатаной полосы с относительно низким уровнем натяжения – в непрерывных агрегатах отжига, цинкования, порезки и др. [5].

Известные зависимости амплитуды неплоскостности от натяжения полосы в основном эмпирические и выведены для частных условий. Расчет максимальных напряжений натяжения осуществляется по зависимостям, выведенным для случаев натяжения полосы со скрытым дефектом и применяе-

мым в ограниченных условиях [6]. В основном зависимости получены для симметричной неплоскостности [7,8], которая является частным случаем более сложных видов этого дефекта [9,10]. В работе [11] исследовано напряженно-деформированное состояние при упругом растяжении полосы с несимметричной неплоскостностью при квадратичном законе распределения напряжений по ширине. Однако известно, что напряжения по ширине неплоской полосы могут распределяться и по другим законам [12], в том числе и по синусоидальному [10], что является актуальным и для полос с несимметричной неплоскостностью.

Цель настоящей работы – получение более точных зависимостей для расчета максимальных напряжений натяжения и параметров неплоскостности при упругом растяжении полос с несимметричной волнистостью и коробоватостью для синусоидального закона.

### Результаты исследования

При упругом растяжении неплоских полос величина неплоскостности уменьшается за счет упругой деформации кромок (для коробоватости) или середины (для волнистости). После уменьшения натяжения полоса в упругой области деформируется в обратном порядке [2,6], т.е. параметры неплоскостности (высота и длина волны) возвращаются к исходным величинам. При этом в процессе упругого растяжения изменяется и напряженно-деформированное состояние неплоской полосы.

Выведем зависимость для расчета максимальных напряжений натяжения  $\sigma_{\max}$  при синусоидальном законе распределения напряжений  $\sigma_x$  по ширине полосы (наиболее общим случаем является растяжение полос с несимметричной неплоскостностью).

Для этого рассмотрим синусоидальный закон распределения  $\sigma_x$  по ширине полосы для несимметричной волнистости и коробоватости в виде

$$\sigma_x = \frac{\Delta\sigma_1}{2} \cos \frac{\pi}{b_0} x + \frac{\Delta\sigma_1}{2}, \quad (1)$$

здесь  $b_0$  – наибольшее расстояние от кромки полосы (например, левой) до оси эпюры  $\Delta\sigma_x$ , определяемое исходя из граничных условий:

– для волнистости (рис. 1, I):

$$b_0 = \frac{B}{\frac{1}{\pi} \arccos \left( 1 - \frac{2\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1} \right) + 1}, \quad (2)$$

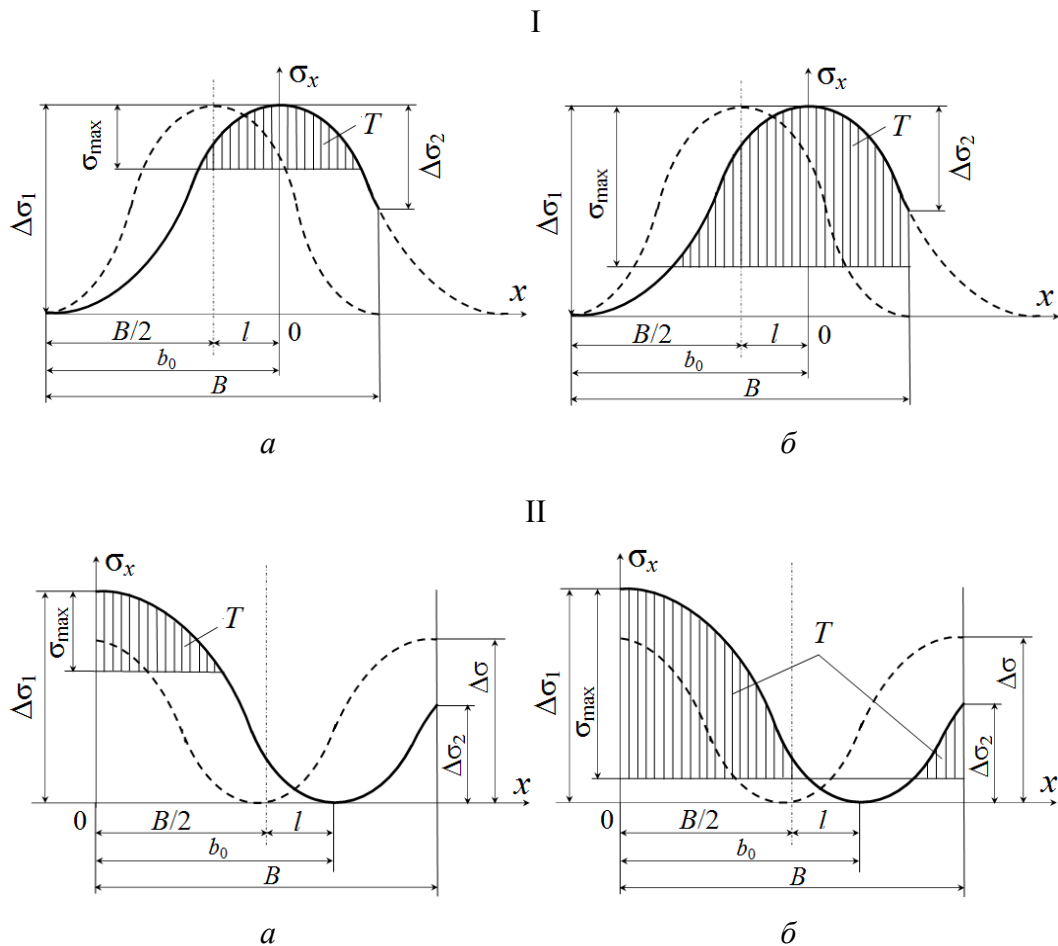
– для коробоватости (рис. 1, II):

$$b_0 = \frac{B}{2} + l, \quad (3)$$

где  $\Delta\sigma_1$  и  $\Delta\sigma_2$  – неравномерности напряжений натяжения между серединой полосы и соответственно левой и правой кромками, когда напряжения при растяжении распределяются по всей ширине;  $B$  – ширина полосы;  $l$  – величина смещения эпюры  $\sigma_x$  относительно оси полосы;  $\Delta\sigma$  – неравномерность напряжений натяжения между кромками и серединой коробоватой полосы до смещения эпюры  $\sigma_x$  (в случае, если бы полоса имела симметричную коробоватость).

При  $\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_2$  и  $l = 0$  из (1) и (3) получим зависимости распределения  $\sigma_x$  для симметричной неплоскостности, приведенные в работе [7].

Далее рассмотрим напряженное состояние полосы для случая, когда напряжения натяжения не достигли одной из кромок полосы (например, правой). В этом случае для волнистой полосы  $\sigma_{\max} < \Delta\sigma_2$  (рис. 1, I, a), для коробоватой  $\sigma_{\max} < \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2$  (рис. 1, II, a).



**Рис. 1.** Эпюры распределения напряжений натяжения по ширине полосы с несимметричной волнистостью (I) и коробоватостью (II) для синусоидального закона распределения  $\sigma_x$ : I – при  $\sigma_{\max} < \Delta\sigma_2$  (a) и при  $\sigma_{\max} > \Delta\sigma_1$  (б); II – при  $\sigma_{\max} < \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2$  (a) и при  $\sigma_{\max} > \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2$  (б)

Из условия равенства силы натяжения  $T$  площади эпюры  $\sigma_x$ , интегрируя по  $d\sigma_x$  и выражая  $x$  из (1), (3) с учетом зависимости (2) и толщины полосы  $h$ , получаем:

– для волнистости при  $\sigma_{\max} < \Delta\sigma_2$  (рис. 1, I, a):

$$T = 2h \frac{b_0}{\pi} \int_{\Delta\sigma_1 - \sigma_{\max}}^{\Delta\sigma_1} \arccos\left(\frac{2\sigma_x}{\Delta\sigma_1} - 1\right) d\sigma_x, \quad (4)$$

где  $b_0$  определяется по формуле (2);

– для коробоватости при  $\sigma_{\max} < \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2$  (рис. 1, II, a):

$$T = 2h \frac{b_0}{\pi} \int_{\Delta\sigma_1 - \sigma_{\max}}^{\Delta\sigma_1} \arccos\left(\frac{2\sigma_x}{\Delta\sigma_1} - 1\right) d\sigma_x, \quad (5)$$

где  $b_0$  определяется по формуле (3).

Учитывая, что  $T = \sigma_{\text{сп}} Bh$ , после интегрирования и преобразования (4) с учетом (2) находим зависимость для расчета напряжения натяжения  $\sigma_{\text{сп}}$  для несимметричной волнистости при  $\sigma_{\max} < \Delta\sigma_2$  (рис. 1, I, a):

$$\sigma_{\text{сп}} = \frac{\Delta\sigma_1}{\arccos\left(1 - \frac{2\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1}\right) + \pi} \left[ \left( \frac{2\sigma_{\max}}{\Delta\sigma_1} - 1 \right) \arccos\left(1 - \frac{2\sigma_{\max}}{\Delta\sigma_1}\right) + 2\sqrt{\frac{\sigma_{\max}}{\Delta\sigma_1} - \left(\frac{\sigma_{\max}}{\Delta\sigma_1}\right)^2} \right]. \quad (6)$$

Здесь связь между  $\Delta\sigma_1$  и  $\Delta\sigma_2$  и параметрами волнистости можно определить, используя зависимости, полученные в работах [6,7]:

$$\Delta\sigma_1 = a_B E \left( \frac{A_{01}\pi}{2\lambda_{01}} \right)^2, \quad (7)$$

$$\Delta\sigma_2 = a_B E \left( \frac{A_{02}\pi}{2\lambda_{02}} \right)^2, \quad (8)$$

где  $a_B$  – коэффициент, учитывающий материальную связь участков по ширине полосы ( $a_B \approx 1$ ) [7];  $E$  – модуль упругости полосы;  $A_{01}$ ,  $\lambda_1$  – соответственно амплитуда и период волнистости по левой кромке полосы до приложения натяжения;  $A_{02}$ ,  $\lambda_2$  – то же по правой кромке полосы.

Аналогично после интегрирования и преобразования (5) и с учетом (3) находим зависимость для расчета напряжения натяжения  $\sigma_{\text{сп}}$  для несимметричной коробоватости при  $\sigma_{\max} < \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2$  (рис. 1, II, a):

$$\sigma_{sp} = \frac{\left(1 + \frac{2l}{B}\right)\Delta\sigma_1}{4\pi} \left[ \left( \frac{2\sigma_{max}}{\Delta\sigma_1} - 1 \right) \arccos \left( 1 - \frac{2\sigma_{max}}{\Delta\sigma_1} \right) + 2\sqrt{\frac{\sigma_{max}}{\Delta\sigma_1} - \left( \frac{\sigma_{max}}{\Delta\sigma_1} \right)^2} \right]. \quad (9)$$

Поскольку величина несимметричной коробоватости определяется максимальной неравномерностью деформаций по ширине полосы, аналогично (7) и (8) получаем для коробоватости:

$$\Delta\sigma_1 = a_B E \left( \frac{A_0^1 \pi}{2\lambda_0^1} \right)^2, \quad (10)$$

где  $A_0^1, \lambda_0^1$  – соответственно амплитуда и период коробоватости до приложения натяжения к полосе.

Далее рассмотрим напряженное состояние неплоской полосы, когда напряжения натяжения достигли обеих кромок, т.е. для несимметричной волнистости  $\sigma_{max} > \Delta\sigma_2$  (по правой кромке неплоскость равна нулю и находится в виде скрытого дефекта) и для несимметричной коробоватости  $\sigma_{max} > \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2$ . Аналогично (4), (5) сила натяжения будет равна:

– для волнистости при  $\sigma_{max} > \Delta\sigma_2$  (рис. 1, I, б):

$$T = 2h \frac{b_0}{\pi} \int_{\Delta\sigma_1 - \sigma_{max}}^{\Delta\sigma_1} \arccos \left( \frac{2\sigma_x}{\Delta\sigma_1} - 1 \right) d\sigma_x + 2h \frac{b_0}{\pi} \int_{\Delta\sigma_1 - \sigma_2}^{\Delta\sigma_1} \arccos \left( \frac{2\sigma_x}{\Delta\sigma_1} - 1 \right) d\sigma_x + h(B - b_0)(\sigma_{max} - \Delta\sigma_2); \quad (11)$$

– для коробоватости при  $\sigma_{max} > \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2$  (рис. 1, II, б):

$$T = 2h \frac{b_0}{\pi} \int_{\Delta\sigma_1 - \sigma_{max}}^{\Delta\sigma_1} \arccos \left( \frac{2\sigma_x}{\Delta\sigma_1} - 1 \right) d\sigma_x + 2h \frac{b_0}{\pi} \int_{\Delta\sigma_1 - \sigma_2}^{\Delta\sigma_1} \arccos \left( \frac{2\sigma_x}{\Delta\sigma_1} - 1 \right) d\sigma_x - 2hl(\sigma_{max} + \Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_1). \quad (12)$$

После интегрирования и преобразования (11), (12) с учетом (2) и (3) получаем:

– для несимметричной волнистости при  $\sigma_{max} > \Delta\sigma_2$  (рис. 1, I, б):

$$\sigma_{sp} = \frac{\Delta\sigma_1}{2 \arccos \left( 1 - \frac{2\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1} \right) + 2\pi} \left[ \left( \frac{2\sigma_{max}}{\Delta\sigma_1} - 1 \right) \arccos \left( 1 - \frac{2\sigma_{max}}{\Delta\sigma_1} \right) + \right.$$

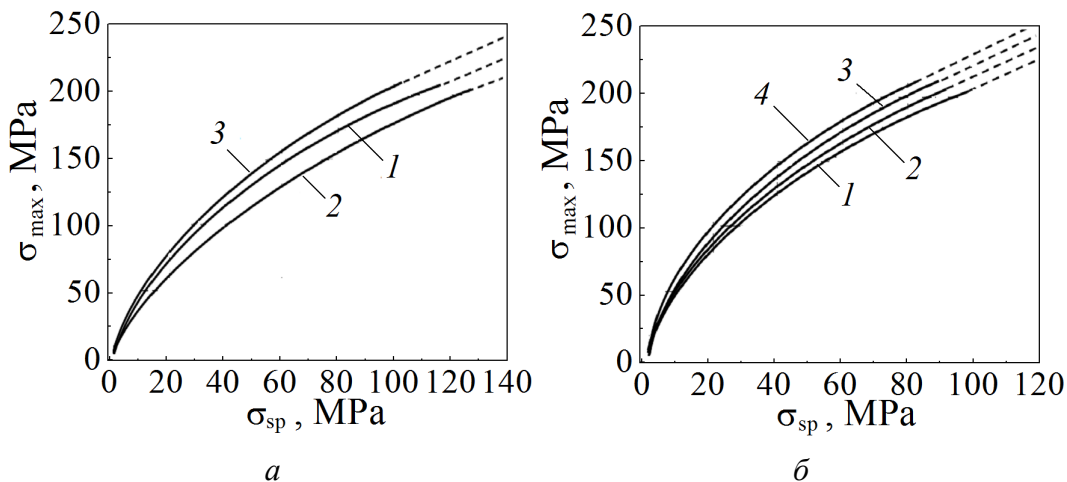
$$\begin{aligned}
 & + 2\sqrt{\frac{\sigma_{\max}}{\Delta\sigma_1} - \left(\frac{\sigma_{\max}}{\Delta\sigma_1}\right)^2} + \left(\frac{2\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1} - 1\right) \arccos\left(1 - \frac{2\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1}\right) + \\
 & + 2\sqrt{\frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1} - \left(\frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1}\right)^2} + \frac{2(\sigma_{\max} - \Delta\sigma_2)}{\Delta\sigma_1} \arccos\left(1 - \frac{2\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1}\right) \Bigg]; \quad (13)
 \end{aligned}$$

– для несимметричной коробоватости при  $\sigma_{\max} > \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2$  (рис. 1, II, б):

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\text{sp}} = & \frac{\left(1 + \frac{2l}{B}\right)\Delta\sigma_1}{4\pi} \left[ 2\left(\frac{2\sigma_{\max}}{\Delta\sigma_1} - 1\right) \arccos\left(1 - \frac{2\sigma_{\max}}{\Delta\sigma_1}\right) + \right. \\
 & + 4\sqrt{\frac{\sigma_{\max}}{\Delta\sigma_1} - \left(\frac{\sigma_{\max}}{\Delta\sigma_1}\right)^2} + \left(\frac{2\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1} - 1\right) \arccos\left(\frac{2\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1} - 1\right) - \\
 & \left. - 2\sqrt{\frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1} - \left(\frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1}\right)^2} \right] - \frac{2l}{B}(\sigma_{\max} + \Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_1), \quad (14)
 \end{aligned}$$

где  $\Delta\sigma_2$  определяли из (1) с учетом (3) и граничных условий ( $x = B$ ,  $\sigma_x = \Delta\sigma_2$ ):

$$\Delta\sigma_2 = \frac{\Delta\sigma_1}{2} \left( \cos \frac{2\pi B}{B+2l} + 1 \right). \quad (15)$$



**Рис. 2.** Зависимость максимальных напряжений натяжения  $\sigma_{\max}$  от напряжения натяжения полос  $\sigma_{\text{sp}}$  с несимметричной неплоскостью при упругом растяжении для синусоидального закона распределения  $\sigma_x$ : а – для волнистости:  $A_{01} = 20$  mm/m,  $A_{02} = 5$  (кривая 1), 10 (2) и 20 mm/m (3); б – для коробоватости:  $l = 0$  (кривая 1), 100 (2), 200 (3) и 300 mm (4);  $B = 1500$  mm,  $E = 21 \cdot 10^4$  МПа

Таким образом, найдены зависимости для несимметричной волнистости (6), (13) и коробоватости (9), (14) при синусоидальном законе распределения  $\sigma_x$ , позволяющие рассчитывать максимальные напряжения натяжения по ширине полосы при ее упругом растяжении. На рис. 2 графически представлены полученные зависимости относительно  $\sigma_{\max}$  для стальных полос (при ширине полосы  $B = 1500 \text{ mm}$  и модуле упругости  $E = 21 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ ).

Для установления связи между параметрами неплоскостности до и после приложения натяжения при упругом растяжении использовали зависимость, представленную в работах [7,8]:

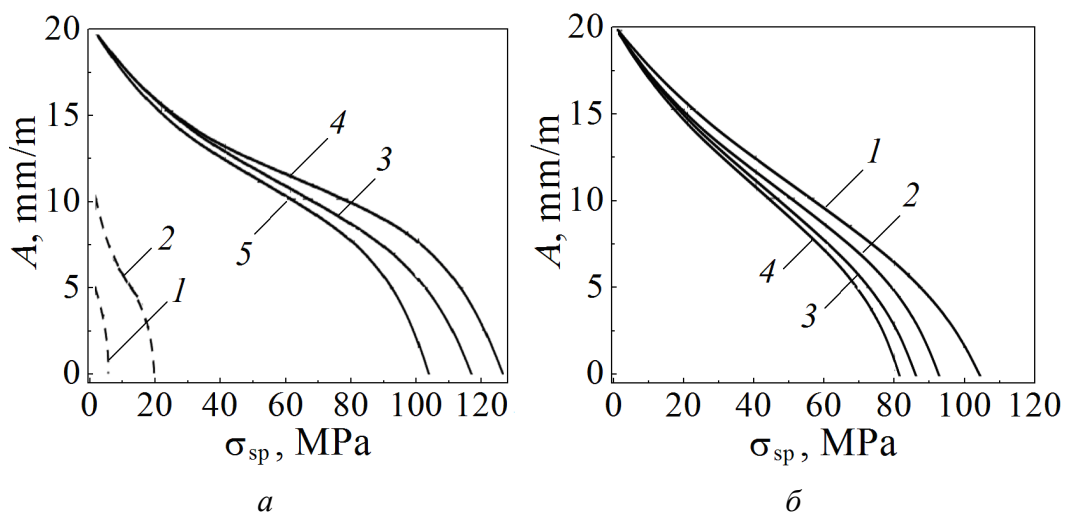
$$\frac{A}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{A_0}{\lambda_0}\right)^2 - \frac{4\sigma_{\max}}{a_B E \pi^2}}, \quad (16)$$

где  $A$ ,  $\lambda$  – соответственно амплитуда и период неплоскостности после приложения натяжения к полосе ( $\lambda = 1000 \text{ mm}$ );  $A_0$ ,  $\lambda_0$  – то же до приложения натяжения к полосе;  $\sigma_{\max}$  определяли в зависимости от вида дефекта по формулам (6), (9), (14), (15).

Если  $\lambda_0 = \lambda$ , то соотношение (16) упрощается:

$$A = \sqrt{A_0^2 - \frac{4\lambda_0^2 \sigma_{\max}}{a_B E \pi^2}}. \quad (17)$$

С использованием уравнений (6), (9), (13), (14) и (17) установили зависимость параметров волнистости и коробоватости стальной полосы от напря-



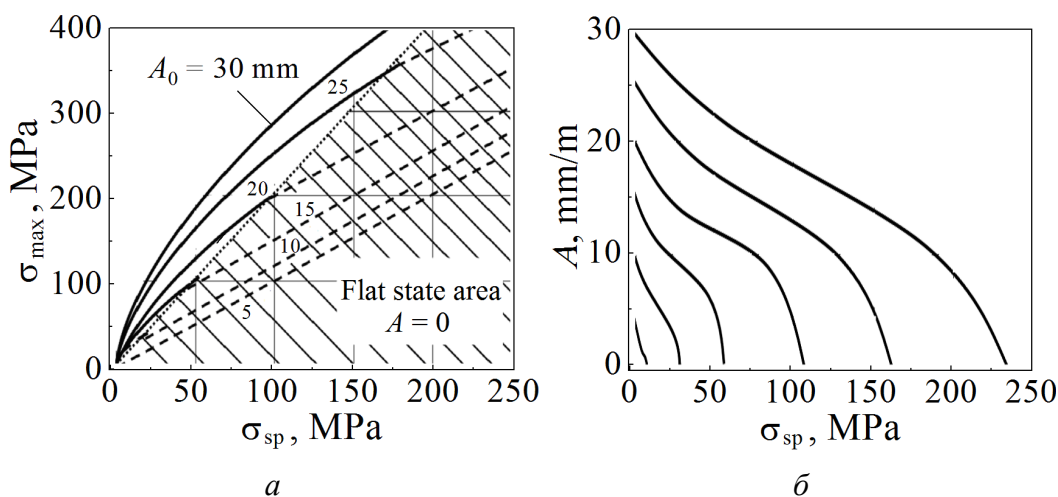
**Рис. 3.** Зависимость амплитуды несимметричной неплоскостности полос  $A$  от напряжения натяжения  $\sigma_{sp}$  при синусоидальном законе распределения  $\sigma_x$ :  $a$  – для волнистости: ----  $A_{02} = 5$  (кривая 1) и 10 mm/m (2); —  $A_{01}$  при  $A_{02} = 5$  (кривая 3), 10 (4) и  $A_{01} = A_{02} = 20$  mm/m (5);  $b$  – для коробоватости при  $l = 0$  (кривая 1), 100 (2), 200 (3) и 300 mm (4);  $B = 1500 \text{ mm}$

жения натяжения, исходной величины и несимметричности неплоскостности (рис. 3).

Из рис. 2 и 3 следует, что с увеличением натяжения максимальные напряжения натяжения по ширине полосы растут и значительно превышают  $\sigma_{sp}$ , исходная величина неплоскостности уменьшается и при определенном напряжении натяжения ( $\sigma_{max} = \Delta\sigma_1$ ) становится равной нулю по обеим кромкам. При дальнейшем увеличении натяжения ( $\sigma_{max} > \Delta\sigma_1$ ) полоса будет сохранять свое плоское состояние, и в этом случае будут справедливы зависимости, приведенные, например, в работе [6]. Необходимо также учитывать, что зависимости (6), (9) и (13), (14) справедливы при  $\Delta\sigma_1 \leq \sigma_{max}$  и  $\sigma_{max} < [\sigma_y]$ , где  $[\sigma_y]$  – предел текучести материала полосы.

Полученные зависимости справедливы и для симметричной неплоскостности. В этом случае при синусоидальном законе распределения  $\sigma_x$  из (6), (9) для симметричной волнистости и коробоватости ( $\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_2 = \Delta\sigma$ ,  $l = 0$ ) найдено:

$$\sigma_{sp} = \frac{\Delta\sigma}{2\pi} \left[ \left( \frac{2\sigma_{max}}{\Delta\sigma} - 1 \right) \arccos \left( 1 - \frac{2\sigma_{max}}{\Delta\sigma} \right) + 2 \sqrt{\frac{\sigma_{max}}{\Delta\sigma} - \left( \frac{\sigma_{max}}{\Delta\sigma} \right)^2} \right]. \quad (18)$$



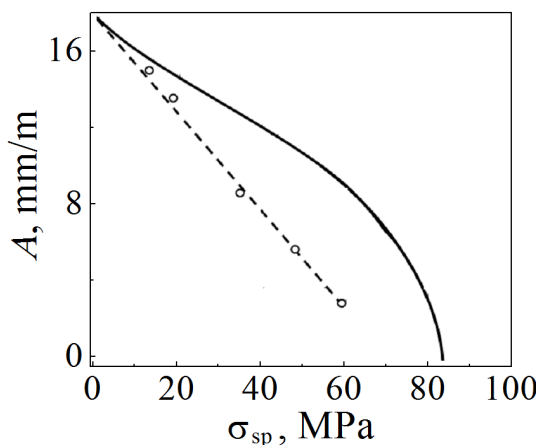
**Рис. 4.** Зависимости максимальных напряжений натяжения  $\sigma_{max}$  (а) и амплитуды симметричной волнистости  $A$  (б) от напряжения натяжения  $\sigma_{sp}$  при синусоидальном законе распределения  $\sigma_x$ : — — по полученной зависимости (18); - - - - по данным работы [7]

Зависимость (18) получена с использованием разработанного в [8] алгоритма и симметричного закона распределения  $\sigma_x$ , что подтверждает правильность найденных зависимостей для несимметричной и симметричной неплоскостности.

Зависимости максимальных напряжений натяжения и параметров симметричной неплоскостности (для синусоидального закона распределения  $\sigma_x$ )



при упругом растяжении волнистых полос представлены на рис. 4. Сплошными линиями показана зависимость, полученная с использованием уравнения (18), штриховыми – с использованием уравнений, приведенных в работе [7], выведенных для случая распределения напряжений натяжения по всей ширине полосы (с полностью скрытым дефектом).



**Рис. 5.** Зависимость амплитуды симметричной волнистости  $A$  от напряжения натяжения  $\sigma_{sp}$  при синусоидальном законе распределения  $\sigma_x$ : — — по полученной зависимости (18); - - - - экспериментальные данные, полученные в работе [6]

Сравнение результатов расчета по зависимостям (17), (18) с экспериментальными данными, полученными на дрессировочном стане 400 Магнитогорского меткомбината с применением метода «муар» [6], показало их хорошую сходимость для синусоидального закона распределения напряжений по ширине полосы (рис. 5).

### Выводы

Получены зависимости для расчета максимальных напряжений натяжения и параметров несимметричной волнистости и коробоватости для синусоидального закона распределения напряжений по ширине полосы. Использование этих зависимостей позволит повысить точность контроля параметров неплоскостности при упругом растяжении полос и соответственно более правильно определить режимы их обработки.

Сравнение полученных зависимостей с известными для симметричной неплоскостности подтвердило их применимость для условий упругого растяжения стальных полос.

1. П.П. Полецков, Вестник МГТУ им. Г.И. Носова № 3, 60 (2011).
2. С.М. Бельский, И.П. Мазур, В.И. Дождиков, В.Б. Васильев, Вестник Тамбовского университета. Серия: естественные и технические науки **18**, № 1, 17 (2013).
3. X.H. Liu, X. Shi, S.H. Li, J.Y. Xu, G.D. Wang, J. Iron Steel Res. Int. **14**, 22 (2007).
4. T. Yazawa, T. Sasaki, H. Rurukawa, Y. Suyanagi, in: Proc. Int. Steel Rolling Conf., Chiba, Japan (1998), pp. 611–616.
5. А.И. Божков, С.Н. Ивлиев, С.В. Бахтин, С.С. Дегтев, И.И.Шотин, Производство проката № 2, 3 (2015).
6. П.И. Денисов, В.А. Некит, А.Г. Медведев, Известия вузов. Черная металлургия № 3, 62 (1985).

7. Ю.Д. Железнов, Прокатка ровных листов и полос, Металлургия, Москва (1971).
8. В.М. Клименко, В.М. Богатырев, С.В. Закарлюка и др., Известия вузов. Черная металлургия № 10, 54 (1986).
9. А.И. Божков, Известия вузов. Черная металлургия № 8, 44 (1998).
10. С.М. Бельский, И.П. Мазур, С.Н. Лежнев, Е.А. Панин, Формоизменение полосы при тонколистовой прокатке: монография, КГИУ, Темиртау (2016).
11. С.В. Закарлюка, Ю.И. Юрченко, В.Е. Гончаров и др., Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр., А.Б. Моллер (ред.), Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, Магнитогорск (2018), вып. 24, с. 3–12.
12. A.E. Dixon, W.Y.D. Yuen, Steel Res. Int. **79**, 287 (2008).

E.A. Rudenko, S.V. Zakarlyuka, V.E. Goncharov, Y.I. Yurchenko, S.A. Budakva

## ELASTIC TENSION OF NON-FLAT STRIPS UNDER STRESSES OF SINUSOIDAL DISTRIBUTION

Theoretical dependencies are obtained that establish a relationship between the tension stresses and asymmetric non-flatness parameters under elastic stretching of the strips for sinusoidal stress distribution law. In the case of partial concealment of a defect in a stretched strip, these dependencies allow for more accurate calculation of the maximum stresses and non-flatness parameters and, accordingly, for more correctly set processing modes, reduced probability of strip breakage (for example, in continuous units in the course of rolling, annealing, galvanizing, training, etc.).

**Keywords:** strip, waviness, corrugation, asymmetric non-flatness parameters, tension stresses, sinusoidal law of stresses in width, elastic stretching

**Fig. 1.** Diagrams of the distribution of tension stresses across the strip with asymmetric waviness (I) and with asymmetric corrugation (II) for the sinusoidal law of distribution  $\sigma_x$ : I – at  $\sigma_{\max} < \Delta\sigma_2$  (a) and at  $\sigma_{\max} > \Delta\sigma_2$  (b); II – at  $\sigma_{\max} < \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2$  (a) and at  $\sigma_{\max} > \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2$  (b)

**Fig. 2.** The dependence of the maximum tension stresses  $\sigma_{\max}$  on the tension stress of the strip with asymmetric non-flatness under elastic tension  $\sigma_{sp}$  for the sinusoidal law of distribution  $\sigma_x$ : a – for waviness:  $A_{01} = 20$  mm/m,  $A_{02} = 5$  (curve 1), 10 (2) and 20 mm/m (3); b – for corrugation:  $l = 0$  (curve 1), 100 (2), 200 (3) and 300 mm (4);  $B = 1500$  mm,  $E = 21 \cdot 10^4$  MPa

**Fig. 3.** The dependence of the amplitude of the asymmetric non-flatness of the strips  $A$  on the tension stress  $\sigma_{sp}$  with the sinusoidal law of distribution  $\sigma_x$ : a – for waviness: ---  $A_{02} = 5$  (curve 1) and 10 mm/m (2); —  $A_{01}$  at  $A_{02} = 5$  (curve 3), 10 (4) and  $A_{01} = A_{02} = 20$  mm/m (5); b – for corrugation at  $l = 0$  (curve 1), 100 (2), 200 (3) and 300 mm (4);  $B = 1500$  mm

**Fig. 4.** The dependences of the maximum tension stresses  $\sigma_{\max}$  (a) and amplitude of the symmetric waviness  $A$  (b) on the tension stress  $\sigma_{sp}$  for the sinusoidal law of distribution  $\sigma_x$ : — according to the obtained dependence (18); --- according to [7]

**Fig. 5.** The dependence of the amplitude of the symmetric waviness  $A$  on the tension stress  $\sigma_{sp}$  with the sinusoidal law of distribution  $\sigma_x$ : — according to the obtained dependence (18); --- experimental data according to [6]