

Теоретическое исследование особенностей изменения опережения при прокатке с повышенными обжатиями в жестких условиях трения

Выполнен анализ экспериментальной зависимости $S = \varphi(\varepsilon)$ при прокатке с повышенными обжатиями в жестких условиях трения, согласно которой с увеличением частного относительного обжатия ε происходит интенсивный рост опережения S . По утверждению автора [1], «такой аномальный рост опережения при повышенных обжатиях не может быть объяснен с позиций современной теории прокатки».

Результаты теоретического исследования опережения показали, что при определении нейтрального угла с учетом особенностей кинематики очага деформации, зависимость $S = \varphi(\varepsilon)$ при прокатке может описываться возрастающей или куполообразной кривой. Поэтому рост опережения при повышенных обжатиях, квалифицируемый автором как «аномальный», аномалией не является. Это просто закономерность, которая объясняется и описывается с использованием аппарата современной теории прокатки.

Ключевые слова: опережение, прокатка, повышенные обжатия, жесткие условия трения, аномальный рост.

Опережение является одним из основных кинематических параметров процесса прокатки. Оно показывает насколько скорость полосы на выходе из очага деформации превышает окружную скорость валков. Величина опережения зависит напрямую от протяженности зоны опережения или от нейтрального угла при прокатке. Это подтверждается тем фактом, что нейтральный угол входит прямым множителем во всех теоретических формулах для определения опережения [2, 3]. Кроме того, опережение, являясь частью вытяжки, способствует также росту поперечной деформации за счет вытяжки, оказывая тем самым влияние и на закономерности течения металла в очаге деформации [1, 4]. Однако, несмотря на столь значимую роль опережения при реализации процесса прокатки, оно продолжает оставаться одним из наименее изученных параметров. В последние годы публикации, посвященные исследованию опережения, практически отсутствуют. Поэтому о роли, уровне и характере изменения опережения от параметров прокатки судят по результатам исследований, которые были выполнены и опубликованы более 40–50 лет тому назад. Итогом этих работ явились следующие формулы для расчета опережения S и нейтрального угла γ при симметричном установившемся процессе прокатки тонких и широких полос без натяжения [2, 3].

$$S = \frac{R\gamma^2}{h_1}; \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta_y} \right), \quad (2)$$

где R , h_1 – радиус валков и толщина полосы на выходе из очага деформации, мм; α , β – угол захвата и угол трения ($\tan \beta = f$) рад; f – коэффициент трения.

На основании результатов ранее выполненных исследований, в научно-технической литературе по прокатке сформировалось устойчивое представление, что зависимость опережения S от частного относительного обжатия ε описывается некоторой кривой типа несимметричной параболы. В соответствии с этой кривой, опережение с ростом частного относительного обжатия вначале увеличивается до некоторого максимального значения, а затем плавно убывает вплоть до нуля [1–4]. Такой характер зависимости $S = \varphi(\varepsilon)$ отражает закономерности кинематики очага деформации при прокатке тонких полос и полос средней толщины с небольшими частными относительными обжатиями и сравнительно низкими значениями коэффициента трения.

При прокатке с повышенными обжатиями в жестких условиях трения установлена иная зависимость $S = \varphi(\varepsilon)$, вид которой показан на рис. 1. Эта зависимость получена экспериментальным путем Ф. Е. Долженковым при прокатке свинцовых полос толщиной 12,5 мм в валках диаметром 125 мм с грубой накатанной поверхностью и опубликована в работе [1]. При проведении экспериментов имело место «полное прилипание», но процесс прокатки «протекал» вполне нормально и мало отличался от обычного [1]. В кратком изложении результатов выполненного исследования автор отмечает, что при увеличении частного относительного обжатия опережение в начале увеличивается, после чего «незначительно падает, а затем резко возрастает при дальнейшем увеличении обжатия и при обжатии 0,85 достигает 0,068. Такой аномальный рост опережения при повышенных обжатиях не может быть объяснен с позиций современной теории прокатки» [1, с. 67].

Настоящая статья посвящена анализу причин, исследованию особенностей и изысканию возможностей для теоретического описания «аномального роста» и характера изменения опережения при про-

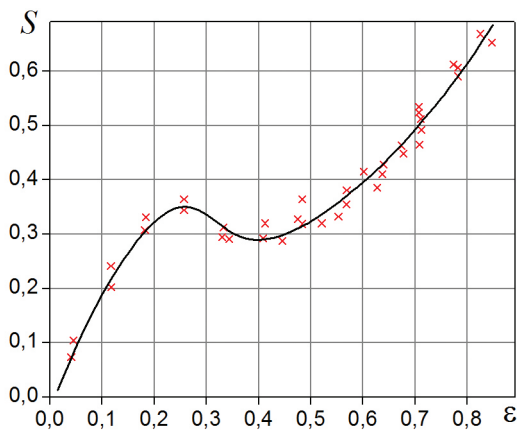


Рис. 1. Экспериментальная зависимость $S = \varphi(\varepsilon)$, полученная при прокатке свинцовых полос в валках с грубой накатанной поверхностью [1]

катке с повышенными обжатиями в жестких условиях трения.

Измерение опережения в работе [1] осуществлялось керновым методом. Частные относительные обжатия при прокатке изменялись от 0,046 до 0,855. Представленная на рис. 1 графическая зависимость $S = \varphi(\varepsilon)$, судя по всему, проведена интуитивно, исходя из визуального восприятия характера распределения поля экспериментальных значений опережения, то есть без статистической обработки и оценки точности полученных данных, что несколько снижает ее ценность и надежность.

До опубликования приведенной на рис. 1 зависимости $S = \varphi(\varepsilon)$, в литературе отсутствовали данные о характере изменения опережения при прокатке с большими частными относительными обжатиями в жестких условиях трения. Поэтому для решения поставленной в настоящей работе задачи, пользуясь данными рис. 1, подсчитаны геометрические параметры прокатки для каждого экспериментального значения опережения. Параллельно с этим рассчитаны значения нейтрального угла γ и опережения S по теоретическим формулам. Расчеты показали, что в условиях выполненного эксперимента, значения параметров l/h_{cp} (где l , h_{cp} – длина очага деформации и средняя толщина полосы в очаге, мм) и R/h_1 (где R , h_1 – радиус валков и толщина полосы на выходе из очага деформации, мм) составляют соответственно 0,49–3,61 и 5,2–34,5. Как видно, значения фактора формы l/h_{cp} соответствуют условиям деформации при прокатке полос средней толщины, когда влияние неравномерности деформации на параметры процесса не очень существенно [2, 3]. Учитывая, что $2R/h_1 \gg 1$ и пренебрегая влиянием неравномерности деформации, расчет опережения произведен по формуле (1) Головина-Дрездена.

В ходе исследования было установлено, что точность и надежность расчета опережения зависит, прежде всего, от точности и надежности определения нейтрального угла. Ранее авторами данной статьи было показано, что расчетные значения угла γ по формуле (2) получаются всегда сильно завышен-

ными, особенно при больших значениях параметра α/β [5]. Поэтому расчет нейтрального угла γ в данной работе осуществляли также и по уточненной формуле (3), полученной с использованием новой модели напряжений трения [3, 5]:

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{n\beta} \right), \quad (3)$$

где

$$n = 1 + 0,12 \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^2. \quad (4)$$

Для выполнения расчетов опережения и нейтрального угла по формулам (1)–(4) необходимо знать величину коэффициента трения f . Поскольку в работе [1] исследования по определению коэффициента трения не проводились, было принято решение при выполнении расчетов опережения для целей анализа использовать подходящие, одинаковые для всех обжатий значения коэффициента трения, обеспечивающее приемлемое (удовлетворительное) совпадение расчетных величин опережения с экспериментальными данными. Оказалось, что этим требованиям отвечают значения коэффициента трения, равные 0,49, которые близко соответствуют экспериментальным данным, полученным при прокатке в валках после грубой обточки [6].

Результаты расчетов в виде зависимостей $\gamma = \varphi(\varepsilon)$ (кривые 1, 2) и $S = \varphi(\varepsilon)$ (кривые 3, 4) при $f = 0,49$ представлены на рис. 2. Для сравнения на этом рисунке приведены также экспериментальная зависимость $S = \varphi(\varepsilon)$ (кривая 5), графики зависимостей $l/h_{cp} = \varphi(\varepsilon)$ (кривая 6) и $R/h_1 = \varphi(\varepsilon)$ (кривая 7).

Из рис. 2 видно, что нейтральный угол (кривая 1) и опережение (кривая 3), рассчитанные с применением формулы (2) для определения угла γ , характеризуются большой интенсивностью роста и при частных относительных обжатиях, превышающих соответственно 0,14 и 0,35, приобретают чрезмерно

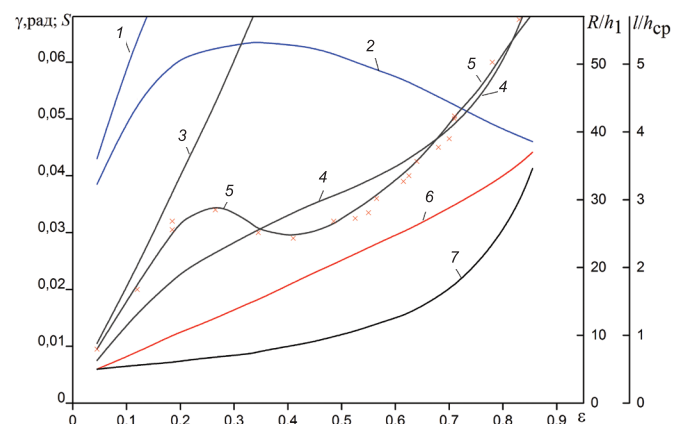


Рис. 2. Расчетные (кривые 1–4, 6, 7) и экспериментальная (кривая 5) зависимости параметров прокатки, построенные для условий деформации выполненного эксперимента (рис. 1): 1 – по формуле (2); 2 – то же (3); 3 – при расчете угла γ по формуле (2); 4 – при расчете угла γ по формуле (3).

большие, то есть маловероятные значения. В случае использования формулы (3) для определения нейтрального угла зависимость $\gamma = \varphi(\varepsilon)$ выражается кривой 2 с максимумом при $\varepsilon = 0,345$, что логично, а опережение описывается более сложной восходящей кривой 4. В целом расчетная зависимость опережения $S = \varphi(\varepsilon)$ (кривая 4), полученная с использованием формулы (3) для определения нейтрального угла, представляется вполне убедительной и достаточно надежной, поскольку она, как и экспериментальная кривая 5, подтверждает факт роста опережения с ростом относительного обжатия. Более того, расчетные и экспериментальные значения опережения при обжатиях более 0,600 практически совпадают и приобретают максимальные значения при $\varepsilon = 0,855$, равные соответственно 0,073 и 0,068. Вместе с тем наличие максимума при $\varepsilon = 0,265$ и минимума при $\varepsilon = 0,41$, зафиксированные на экспериментальной кривой $S = \varphi(\varepsilon)$, при расчетном определении опережения $S = \varphi(\varepsilon)$ (кривая 4) подтверждения не получили. Зато при указанных обжатиях выявлены наибольшие расхождения между расчетными и экспериментальными значениями опережения.

Здесь необходимо отметить, что перед настоящей работой не ставилась задача разработать методику расчета опережения при прокатке с повышенными обжатиями в жестких условиях трения. Задача была значительно скромнее – показать, возможно ли с помощью аппарата современной теории прокатки подтвердить и объяснить «аномальный рост опережения при повышенных обжатиях» [1, с. 67], когда процесс прокатки реализуется в жестких условиях трения. Как видно, эта цель достигнута, по крайней мере, при прокатке с большими частными относительными обжатиями.

Результаты выполненного исследования показали, что при уменьшении коэффициента трения и частного относительного обжатия, расчетные значения опережения зависят в основном от нейтрального угла, точнее от надежности и точности его определения. При прокатке с большими частными относительными обжатиями и с большими коэффициентами

трения существенное влияние на величину опережения оказывают численные значения параметра R/h_1 . Эти выводы справедливы для случая, когда расчет опережения производится с использованием формулы (3) для определения нейтрального угла. В этом случае при прокатке с малыми коэффициентами трения функция $\gamma = \varphi(\varepsilon)$ приобретает максимальные значения в диапазоне сравнительно небольших частных относительных обжатий, что влияет на уровень опережения в сторону его увеличения. Но при прокатке с малыми коэффициентами трения абсолютные значения нейтрального угла получаются небольшими, и процесс прокатки осуществляется с относительно низкими величинами опережения. По мере увеличения коэффициента трения и частного относительного обжатия при прокатке максимум функции $\gamma = \varphi(\varepsilon)$ сдвигается в сторону больших обжатий, что приводит к увеличению нейтрального угла и параметра R/h_1 и, как следствие, к увеличению опережения. Однако, с увеличением частного относительного обжатия после достижения максимума функции $\gamma = \varphi(\varepsilon)$ ухудшается захватывающая способность валков, что приводит к уменьшению нейтрального угла вплоть до нуля, когда наступает буксование. Качественно такое влияние на опережение оказывают условия прокатки, когда расчет данного параметра осуществляется с применением формулы (2) для определения нейтрального угла. Однако, из-за того, что расчетные значения нейтрального угла по формуле (2) получаются всегда сильно завышенными, обычно нереальными получаются и значения опережения, что исключает возможность ее применения для прогнозирования опережения при прокатке.

Описанные выше закономерности изменения функций $\gamma = \varphi(\varepsilon)$ и $S = \varphi(\varepsilon)$ применительно к условиям прокатки анализируемого эксперимента представлены на рис. 3. Для большей наглядности и удобства анализа на этом рисунке приведены зависимости $\gamma = \varphi(\varepsilon)$ и $S = \varphi(\varepsilon)$ для двух значений коэффициента трения – 0,49 и 0,40, подсчитанные с использованием формул для определения нейтрального угла (3) (рис. 3, а) и (2) (рис. 3, б).

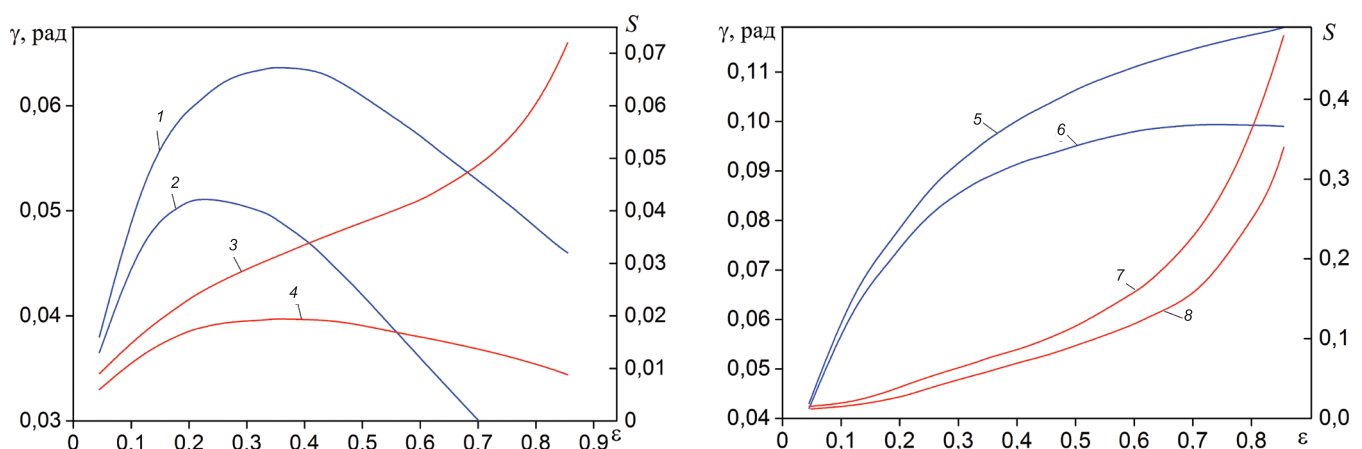


Рис. 3. Расчетные зависимости $\gamma = \varphi(\varepsilon)$ (кривые 1, 2, 5, 6) и $S = \varphi(\varepsilon)$ (кривые 3, 4, 7, 8), построенные для условий прокатки (рис. 1): 1, 3, 5, 7 – при $f = 0,49$; 2, 4, 6, 8 – при $f = 0,40$; 3, 4, 7, 8 – по формуле (1); 1, 2 – то же (3); 5, 6 – то же (2)

Как следует из рис. 3, а при прокатке в жестких условиях трения ($f = 0,49$) зависимость $\gamma = \varphi(\varepsilon)$ (кривая 1) имеет ярко выраженный максимум при $\varepsilon = 0,345$, в то время как опережение (кривая 3) с ростом относительного обжатия непрерывно увеличивается. При прокатке с меньшим коэффициентом трения ($f = 0,40$), то есть в менее жестких условиях трения, зависимость $\gamma = \varphi(\varepsilon)$ (кривая 2) качественно не меняется, однако при этом зависимость $S = \varphi(\varepsilon)$ (кривая 4) претерпевает кардинальные качественные и существенные количественные изменения. Она описывается уже не возрастающей, а куполообразной кривой с максимумом при $\varepsilon = 0,41$ и характеризуется значительно более низкими значениями опережения, стремящимся к нулю при $\gamma \rightarrow 0$. Таким образом, в зависимости от коэффициента трения и величины параметра R/h_1 , изменение опережения с ростом частного относительного обжатия может описываться возрастающей или куполообразной кривой. Поэтому «рост опережения при повышенных обжатиях», квалифицируемый автором работы [1] как «аномальный», аномалией не является. Это просто закономерность изменения опережения при прокатке с повышенными обжатиями в жестких условиях трения, которая объясняется и описывается с использованием аппарата современной теории прокатки [5].

Когда расчет опережения производится с использованием формулы (2) для определения нейтрального угла (рис. 3, б) максимум функции $\gamma = \varphi(\varepsilon)$ даже при $f = 0,40$ не достигается в диапазоне исследованных обжатий. Поэтому зависимости $S = \varphi(\varepsilon)$ при $f = 0,49$ и $f = 0,40$ описываются возрастающими кривыми 7 и 8 и характеризуются чрезмерно большими (неправдоподобными) значениями опережения. Это лишнее подтверждает, что формула Экелунда-Павлова не может быть рекомендована для определения нейтрального угла при выполнении расчетов опережения при прокатке.

Выводы

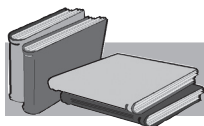
Сложившееся в традиционной теории продольной прокатки представление о характере изменения

опережения S от частного относительного обжатия ε отражает закономерности и особенности кинематики очага деформации при прокатке тонких полос с небольшими обжатиями и относительно низкими значениями коэффициента трения. При прокатке с повышенными обжатиями в жестких условиях трения установлена иная зависимость $S = \varphi(\varepsilon)$, зафиксированная впервые экспериментальным путем Ф. Е. Долженковым и приведенная в работе [1].

Дан анализ экспериментальной зависимости $S = \varphi(\varepsilon)$ при прокатке с повышенными обжатиями в жестких условиях трения, свидетельствующей о том, что с увеличением частного относительного обжатия происходит интенсивный рост опережения. По утверждению автора, «такой аномальный рост опережения при повышенных обжатиях не может быть объяснен с позиций современной теории прокатки» [1, с. 67].

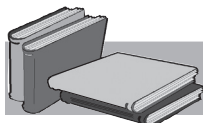
Результаты теоретического исследования опережения с использованием уточненной формулы для определения нейтрального угла показали, что в зависимости от величины коэффициента трения f и параметра R/h_1 (где R, h_1 – радиус валков и толщина полосы на выходе из очага деформации, мм), изменение опережения с ростом частного относительного обжатия может выражаться возрастающей или куполообразной кривой. Поэтому «рост опережения при повышенных обжатиях», квалифицируемый автором работы [1] как «аномальный», аномалией не является. Это просто закономерность изменения опережения при прокатке с повышенными обжатиями в жестких условиях трения, которая описывается с использованием аппарата современной теории продольной прокатки.

Установлено, что расчетные значения нейтрального угла по формуле Экелунда-Павлова являются всегда сильно завышенными, в результате чего и расчетные величины опережения получаются чрезмерно высокими и нереальными. По этой причине данная формула не может быть рекомендована для вычисления нейтрального угла при расчетном определении опережения.



ЛИТЕРАТУРА

1. Долженков Ф. Е. Нерешенные вопросы современной теории прокатки // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Металургія». – Донецьк: ДонНТУ. – 2004. – Вип. 73. – С. 62–67.
2. Грудев А. П. Теория прокатки. Издание 2-е, переработанное и дополненное. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 280 с.
3. Василев Я. Д., Минаев А. А. Теория продольной прокатки. Учебник для магистрантов ВУЗов. – Донецк: УНИТЕХ, 2010. – 456 с.
4. Долженков Ф. Е. Уширение, опережение и вытяжка при продольной прокатке (О некоторых противоречиях современной теории прокатки) // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2003. – № 5. – С. 41–44.
5. Василев Я. Д. Основы теории продольной холодной прокатки // Пластическая деформация металлов: Коллективная монография. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – С. 107–125.
6. Грудев А. П., Зильберг Ю. В., Тилик В. Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. Справочное издание. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.



REFERENCES

1. Dolzhenkov F. E. (2004). Nereshennye voprosy sovremennoi teorii prokatki [Unresolved issues of modern rolling theory]. Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: Metalurgii, Donets'k: DonNTU, iss. 73, pp. 62–67 [in Russian].
2. Grudev A. P. (2001). Teoriia prokatki. Izdanie 2-e, pererabotannoe i dopolnennoe [Theory of rolling. 2nd edition, revised and enlarged]. Moscow: Internet Inzhiniring, 280 p. [in Russian].
3. Vasilev Ya. D., Minaev A. A. (2010). Teoriia prodol'noi prokatki. Uchebnik dlia magistrantov VUZov [Theory of longitudinal rolling. Textbook for master student]. Donetsk: UNITEKH, 456 p. [in Russian].
4. Dolzhenkov F. E. (2013). Ushirenje, operezhenie i vytiashka pri prodol'noi prokatke (O nekotorykh protivorechiakh sovremennoi teorii prokatki) [Broadening, anticipation and stretching during longitudinal rolling (On some of the contradictions in modern rolling theory)] Izv. vuzov. Chernaia metallurgii, no. 5, pp. 41–44 [in Russian].
5. Vasilev Ya. D. (2014). Osnovy teorii prodol'noi kholodnoi prokatki [Fundamentals of the theory of longitudinal cold rolling]. Plasticheskaia deformatsiia metallov: Kollektivnaia monografiia, Dnepropetrovsk: Aktsent PP, pp. 107–125 [in Russian].
6. Grudev A. P., Zil'berg Yu. V., Tiliik V. T. (1982). Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem. Spravochnoe izdanie [Friction and lubrication in the treatment of metals by pressure. Reference edition]. Moscow: Metallurgii, 312 p. [in Russian].

Анотація

Василев Я. Д.

Теоретичне дослідження особливостей зміни випередження при прокатці з підвищеними обтисками у жорстких умовах тертя

Виконано аналіз експериментальної залежності $S = \varphi(\varepsilon)$ при прокатці з підвищеними обтисками в жорстких умовах тертя, згідно з якою зі збільшенням часткового відносного обтиску ε відбувається інтенсивний ріст випередження S . За твердженням автора [1], «таке аномальне зростання випередження при підвищених обтисках не може бути пояснено з позицій сучасної теорії прокатки».

Результати теоретичного дослідження випередження показали, що при визначенні нейтрального кута з урахуванням особливостей кінематики осередку деформації, залежність $S = \varphi(\varepsilon)$ при прокатці може описуватися зростаючою або куполоподібною кривою. Тому зростання випередження при підвищених обтисках, яке кваліфікується автором як «аномальне», аномалією не є. Це просто закономірність, яка пояснюється і описується з використанням апарату сучасної теорії прокатки.

Ключові слова

Випередження, прокатка, підвищені обтиски, жорсткі умови тертя, аномальне зростання.

Summary

Vasilev Ya.

Theoretical study of particular qualities of changing the outrunning at rolling with higher compressions in hard friction conditions

The analysis of the experimental dependence $S = \varphi(\varepsilon)$ for rolling with increased compression under severe friction conditions is performed, according to which, with the increase in the partial relative reduction ε , an intensive growth of the lead S takes place. According to the author [1], "such an anomalous increase in lead with increased compression cannot be explained from the standpoint of the modern theory of rolling".

The results of the theoretical advance study showed that when determining the neutral angle, taking into account the kinematics of the deformation zone, the dependence $S = \varphi(\varepsilon)$ during rolling can be described by an increasing or dome-shaped curve. Therefore, the growth of the lead with increased compression, which the author describes as an «anomalous», is not an anomaly. This is just a regularity, which is explained and described using the apparatus of modern rolling theory.

Keywords

Operation, rolling, increased compression, hard frequency conditions, anomalous growth.

Поступила 11.02.18