

УДК 621. 771.01

Горецкий Ю. В.,  
к.т.н. Денищенко П. Н.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## УЧЕТ УПРУГОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ ВЫСОКИХ РАСКАТОВ

*Рассмотрено влияние различных технологических параметров на упругие свойства системы валок-раскат. Проанализированы методики расчета очага деформации с учетом упругого сжатия валков и постдеформационного восстановления раската. В расчете параметров очага деформации учтено влияние температуры на изменение модуля упругости, выявлено изменение длины дуги захвата и толщины раската от упругого последствия. Учет упругой составляющей при деформации позволит повысить точность расчетов и достичь требуемых показателей по точности проката.*

**Ключевые слова:** очаг деформации, упругая деформация, упругое восстановление раската, точность листового проката.

### Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Основными показателями, определяющими уровень качества листового проката, являются точность размеров и формы листов и полос, соответствие требованиям по химическому составу и физико-механическим свойствам, качеству поверхности. Показателями качества по точности листового проката, обеспечение которых представляет наибольшие трудности, есть отклонения от номинальной толщины и постоянство толщины по длине и ширине (продольная и поперечная разнотолщинность). Чем меньше отклонения (допуски) толщины или разнотолщинности от номинальной величины, тем качество проката выше [1].

Для повышения точности проката необходимо иметь совершенные системы управления процессом деформации, которые базируются на высокоточных расчетах процесса прокатки, в том числе и характеристик очага деформации металла. Геометрическими параметрами очага деформации являются обжатие, уширение, дуга и угол захвата [2].

Поскольку все металлы и сплавы, подвергаемые прокатке, обладают упругими и пластическими свойствами, пластической

деформации полосы валками всегда предшествует и завершает ее упругая деформация: во входной части очага – это деформация упругого сжатия, в выходной – деформация упругого восстановления. Валки под действием силы прокатки упруго прогибаются, а в зоне контакта с полосой – сжимаются упруго в радиальном направлении. В результате упруго-пластического взаимодействия полосы с валками искажается форма контактной линии, увеличивается длина очага деформации и изменяются все параметры процесса прокатки.

Наиболее часто в инженерных расчетах и математических моделях для управления процессами прокатки используются упрощенные формулы для определения параметров очага деформации, что вносит определенную, а иногда и существенную погрешность в расчеты энергосиловых параметров деформации металла и точности проката.

Исходя из этого, для расширения возможностей управления процессом деформации металла с целью повышения точности проката при горячей прокатке необходимо учитывать параметры упругой составляющей валков и полосы в очаге деформации.

**Постановка задачи.** Задачей данной работы является расчет параметров очага деформации при горячей прокатке толстых листов с учетом упругой составляющей деформации валков и полосы и анализ упругого восстановления полосы от изменяемых параметров процесса прокатки.

**Изложение материала и его результаты.** Упругие изменения в металлах подчиняются закону Гука. Для практических целей необходимо знать константы упругости, характеризующие тот или иной материал. Упругость, так же как и другие физические свойства, может быть использована для исследования металлов и сплавов и решения задач металловедения и обработки металлов давлением. Параметры, характеризующие упругость связаны между собой двумя соотношениями [3]:

$$G = \frac{E}{2(\mu + 1)}, \quad (1)$$

$$D \approx \frac{E}{3(1 - 2\mu)}. \quad (2)$$

Три указанные модуля ( $E$ ,  $G$ ,  $D$ ) характеризуют пропорциональность между напряжением и упругой деформацией соответственно при растяжении, сдвиге и всестороннем сжатии.

Модуль упругости является анизотропным свойством, зависящим от направления в кристалле. Модуль упругости металла может быть изменен путем сплавления с некоторыми растворяющимися в нем элементами, так как при этом в кристаллическую структуру вводятся чужеродные атомы, которые изменяют величину сил, возникающих при данной деформации. Однако в общем случае требуются относительно большие концентрации добавок для того, чтобы вызвать даже незначительное изменение модуля упругости. Например, в обычных технических сталях общее содержание примесей никогда не превышает нескольких процентов, и модуль упругости во всех случаях имеет почти постоянное значение, равное  $2,2 \cdot 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>. Модуль упругости любого

пластичного металла может быть слегка увеличен в результате механической обработки, но и в этом случае изменение модуля также незначительно.

В некоторых сплавах (особо важны в этом отношении стали) специальной термической обработкой можно сохранить при комнатной температуре полиморфные формы (например, аустенит), устойчивые только при более высоких температурах, или получить метастабильные фазы (например, мартенсит), которые по своей кристаллической структуре значительно отличаются от устойчивых в данных условиях. Однако изменение модуля упругости, обусловленное термической обработкой, всегда настолько мало, что не имеет существенного значения в техническом отношении и в общем случае им так же можно пренебречь. Таким образом, для существенного изменения жесткости существуют только два способа: увеличение толщины изделия и замена вида сплава [4].

Однако согласно эмпирическому уравнению Портевена [5] с повышением температуры объем увеличивается, следовательно, исходя из формулы (3), модуль упругости будет уменьшаться:

$$E = kT_s^a / V^b, \quad (3)$$

где  $T_s$  – абсолютная температура плавления;  $V$  – удельный объем;  $k$ ,  $a$  и  $b$  – константы.

Эта прямая зависимость  $E$  и  $T_s$  следует из того, что обе эти величины характеризуют силу межатомной связи.

Поскольку температурный коэффициент модуля упругости, так же как коэффициент термического расширения металлов, зависит от температуры плавления  $T_s$ , целесообразно рассмотреть зависимость модуля упругости  $E$  не от фактической температуры  $T$ , а от приведенной температуры  $T/T_s$  (рис. 1). Для большинства металлов модуль упругости  $E$  уменьшается почти линейно с повышением температуры. Полиморфное  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  – превращение желе-

за повышает модуль упругости  $E$  в связи с увеличением компактности решетки. При переходе железа из ферромагнитного состояния в парамагнитное модуль упругости  $E$  уменьшается [5].

Используя данные рисунка 1, можно определить значения модуля упругости для стали в температурном интервале начала и конца прокатки и результаты отразить в таблице 1.

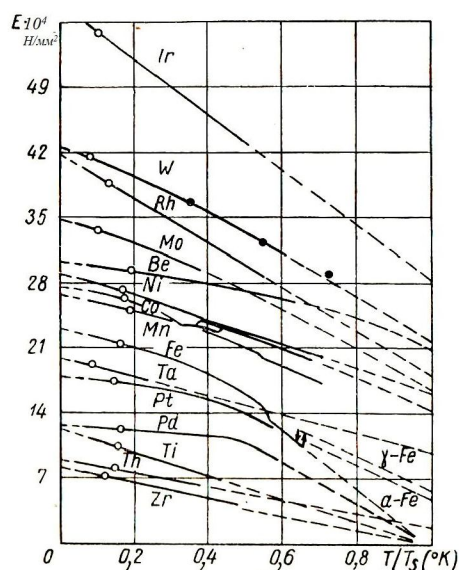


Рисунок 1 Температурная зависимость модуля нормальной упругости [5]

Из таблицы 1 видно, что с повышением температуры в сталях модуль упругости снижается, следовательно упругие свойства стали заметно понижаются. Но, даже при высоких температурах, таких как температура выдачи слэбов из нагревательных печей (1250°C), модуль упругости оказывает влияние на условия деформации. Это свидетельствует о том, что при необходимости точных расчетов характеристик очага деформации при высоких температурах желательно учитывать упругие свойства раската.

Прокатка толстых полос осуществляется только в горячем состоянии. Нагретый до высоких температур металл отличается меньшим сопротивлением деформации и повышенной пластичностью, что позволяет вести процесс горячей прокатки с большими единичными (частными) обжа-

тиями. Пластическая деформация металла при прокатке толстых полос характеризуется малыми значениями параметра  $R/h$  (где  $R$  и  $h$  – радиус валков и толщина полосы до прокатки).

Таблица 1

Значения модуля упругости при температурах начала и конца прокатки толстолистовой стали

Температура (Т°С)	Модуль упругости (Е, МПа)
800	$1,49 \cdot 10^5$
850	$1,43 \cdot 10^5$
900	$1,28 \cdot 10^5$
950	$1,23 \cdot 10^5$
1000	$1,19 \cdot 10^5$
1050	$1,13 \cdot 10^5$
1100	$1,09 \cdot 10^5$
1150	$1,0 \cdot 10^5$
1200	$0,96 \cdot 10^5$
1250	$0,87 \cdot 10^5$

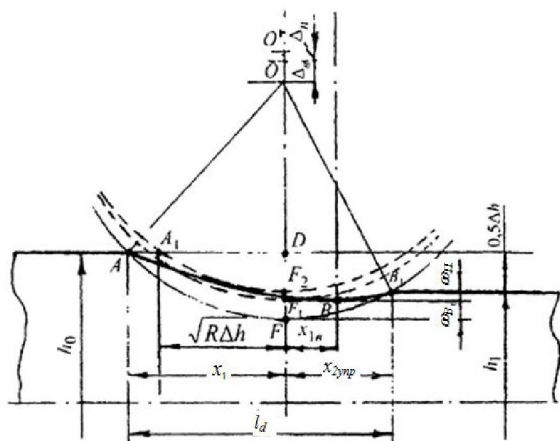
Отличительной особенностью процесса горячей прокатки с малыми значениями параметра  $R/h$  являются большая относительная толщина прокатываемых полос, высокая пластичность деформируемого металла и малая податливость инструмента (валков). Поэтому в теории продольной прокатки при описании данного процесса принимают, что полоса является жестко-пластическим телом, а валки – идеально жесткими телами. При прокатке полосы, обладающей такими свойствами, пластическая деформация металла начинается в сечении входа и заканчивается в сечении выхода из валков. Валки при этом не деформируются. Длина дуги контакта при таком процессе описывается упрощенными формулами (4 – 6):

$$\ell_d = R \cdot \alpha, \quad (4)$$

$$\ell_d = \sqrt{R \cdot \Delta h}, \quad (5)$$

$$\ell_d = \sqrt{R \cdot \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}}, \quad (6)$$





личается меньшим сопротивлением деформации и повышенной пластичностью, но даже при высоких температурах металл, как и другие материалы, имеет упругие свойства, следовательно, как и в случае с холодной прокаткой, определение длины дуги контакта при горячей прокатке может рассчитываться по одним и тем же расчетным формулам. В связи с этим проведен анализ геометрического очага деформации и его составляющих элементов при горячей прокатке.

Местное сплющивание валков и упругое восстановление полосы на выходе из очага деформации оказывает влияние на параметры деформации. Упругая деформация может быть настолько значительной, что окажет заметное влияние на увеличение дуги захвата. Это явление имеет большое значение при определении энергосиловых параметров прокатки и формировании точности проката.

Для исследования очага деформации при горячей прокатке были рассмотрены и просчитаны некоторые из методик определения длины дуги захвата  $l_d$ , принимая

следующие исходные данные:  $H = 142$  мм,  $\Delta h = 18$  мм,  $D_p = 1000$  мм,  $p_{cp} = 63,835$  Н/мм<sup>2</sup>,  $P = 14,621$  МН,  $B = 2414$  мм в условиях ТЛС 3000 ПАО «АМК».

Результаты расчета сведены в таблицу 2 и свидетельствуют, что различные методики дают приблизительно одинаковые значения длины дуги контакта, но упрощенные методики дают большие погрешности относительно методик, учитывающих упруго-пластические свойства прокатываемого металла и рабочего валка.

Так же, по методике А.И. Целикова, был проведен расчет длины дуги контакта при различных температурах прокатки с учетом изменения модуля упругости прокатываемого металла (использовались данные таблицы 1).

Расчет длины дуги контакта с учетом упругих изменений в системе валок-раскат указывает (рис. 3), что снижение модуля упругости приводит к уменьшению протяженности очага деформации.

Таблица 2

Длина дуги контакта, вычисленная по различным методикам

Методика	Параметр $l_d$ (мм)
По общепринятой методике определения $l_d$	94,868
По итерационной методике с учетом сплющивания валков	95,253
По формуле Хитчкока с учетом упругой деформации валков	95,373
По формуле В. Робертса с учетом упругого сжатия валков	94,875
По методике А.И. Целикова с учетом упругой деформации полосы и валка	96,117

Таблица 3

Расчет длины дуги контакта при различных температурах

$T(^{\circ}\text{C})$	$E \cdot 10^5$ (МПа)	$\theta_B$	$\theta_{II} \cdot 10^{-6}$	$P_{cp}$ (МПа)	$x_I$ (мм)	$x_{2упр}$ (мм)	$l_d$ (мм)
800	1,49	1,968 · 10 <sup>-6</sup>	1,945	225,664	94,887	3,532	98,419
850	1,43		2,027	184,187	94,884	2,943	97,827
900	1,28		2,264	152,090	94,882	2,574	97,457
950	1,23		2,356	126,893	94,88	2,195	97,075
1000	1,19		2,435	106,859	94,878	1,882	96,760
1050	1,13		2,565	90,746	94,877	1,645	96,522
1100	1,09		2,659	77,651	94,876	1,437	96,313
1150	1,0		2,898	66,908	94,875	1,302	96,177
1200	0,96		3,019	58,017	94,874	1,157	96,031
1250	0,87		3,331	50,602	94,874	1,072	95,947

На рисунке 4 график зависимости зоны упругого восстановления раската  $x_{2упр}$  от модуля упругости  $E$  отображает результаты расчета, указывающие, что с повышением температуры и снижением модуля упругости протяженность зоны упругого восстановления раската уменьшается.

Согласно исследованиям А.И. Целикова [8, 9] при постоянном контактном давлении для определения сплющивания валков  $\omega_B$  и полосы  $\omega_{II}$  используют упрощенное выражение

$$\omega = 2p \frac{(1 - \nu^2)}{\pi E}, \quad (10)$$

где  $p$  – погонная нагрузка, приходящаяся на единицу длины бочки валков и равна

$$p = \frac{P}{b},$$

где  $P$  – усилие прокатки, Н;  $b$  – ширина раската, мм.

Для рабочего валка на рисунке 5 приведен показатель  $\omega_B$  в зависимости от различной ширины раскатов.

На рисунке 6 приведены результаты расчета величины упругого восстановления полосы  $\omega_{II}$  в зависимости от температуры прокатки и ширины раската.

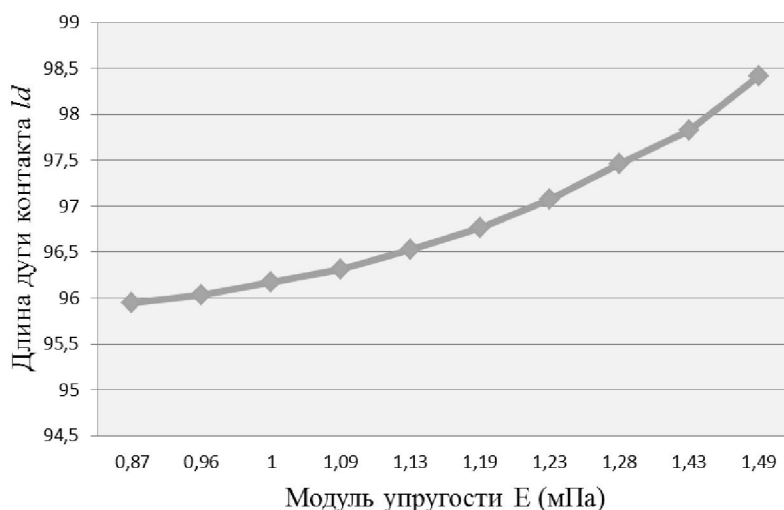


Рисунок 3 График зависимости длины дуги контакта  $l_d$  от модуля упругости

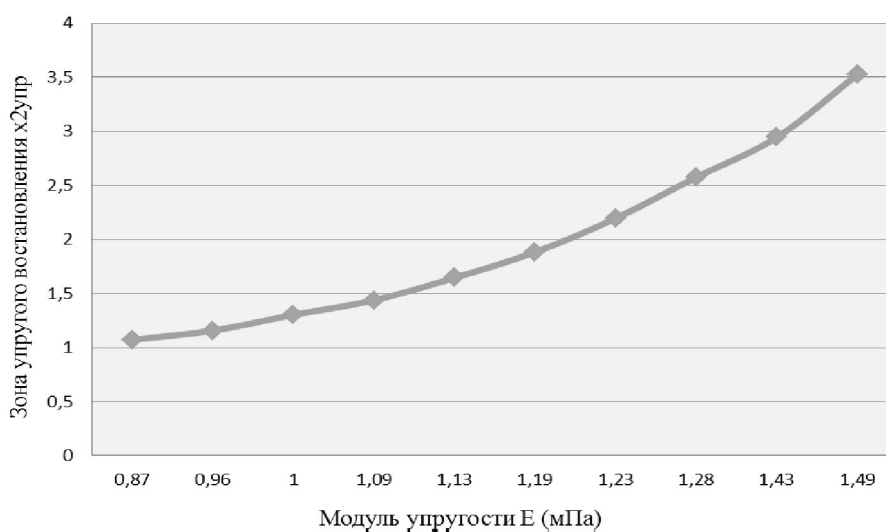
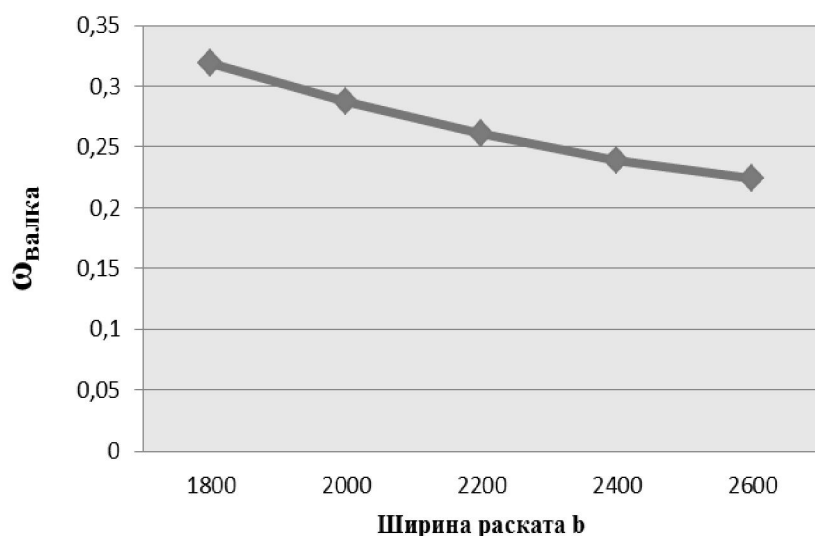
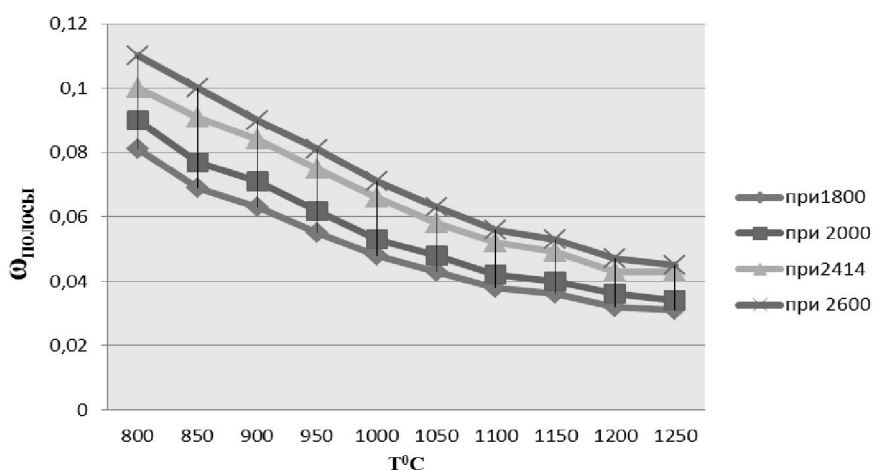


Рисунок 4 График зависимости параметра  $x_{2упр}$  от модуля упругости

Рисунок 5 График зависимости показателя  $\omega_B$  от различной ширины раскатовРисунок 6 График зависимости величины упругой деформации  $\omega_{II}$  прокатываемой полосы от температуры при разной ширине раската

Исследовано влияние диаметра рабочих валков на упругую составляющую полосы  $x_{2упр}$  при условии, что диаметр валков меняется от номинального диаметра  $D_n = 1000$  мм до минимального  $D_m = 940$  мм при постоянной температуре  $T = 1166^\circ\text{C}$ , которой соответствует модуль упругости  $E = 1 \cdot 10^5$  МПа. Расчет проведен по методике А.И. Целикова [10].

Результаты расчета сведены в таблицу 4; из них следует, что с уменьшением диаметра рабочих валков в связи с износом или переточкой параметр  $x_{2упр}$ , характеризующий упругое состояние полосы, уменьшается, что может быть объяснено уменьшением площади контакта прокатываемого металла и валков.

Таблица 4

Зависимость параметра  $x_{2упр}$  от изменения диаметра рабочего валка

D (мм)	1000	990	980	970	960	950	940
$x_{2упр}$ , мм	1,243	1,23	1,217	1,205	1,192	1,180	1,168

### Выводы и направление дальнейших исследований.

В работе проведены исследования очага деформации при горячей прокатке, выявлены особенности изменения элементов очага деформации от условий прокатки. Проведен теоретический анализ различных методик по расчету параметров очага деформации, учитывающих упругие деформации как валков, так и прокатываемой полосы.

Рассмотрено влияние различных факторов на упругие характеристики металла. Выявлено влияние температурного фактора на модуль упругости раската. Так, в температурном интервале деформации металла  $1200^{\circ}\text{C} - 760^{\circ}\text{C}$  модуль упругости меняет свои значения от  $0,96 \cdot 10^5$  МПа до  $1,43 \cdot 10^5$  МПа соответственно.

Выполнен сравнительный анализ методик по определению длины очага деформации при горячей прокатке с учетом упругой составляющей процесса. Проведено численное сравнение результатов расчета по приведенным методикам, которое показало, что большей точностью обладает формула

А.И. Целикова, так как она учитывает не только упругую деформацию валка (что характерно для холодной прокатки), но и упругую деформацию прокатываемой полосы.

В результате проведенных исследований было определено, что для условий прокатки на стане 3000 с повышением температуры от  $800^{\circ}\text{C}$  до  $1250^{\circ}\text{C}$  модуль упругости уменьшается от  $1,49 \cdot 10^5$  до  $0,87 \cdot 10^5$  МПа, вследствие чего длина очага деформации при горячей прокатке уменьшается с 98,419 мм до 95,947 мм. С уменьшением модуля упругости величина упругого восстановления полосы уменьшается с 3,532 мм до 1,072 мм, также величина упругого восстановления полосы зависит от диаметра валков и ширины раската.

Таким образом, учет влияния температуры прокатки на упругие характеристики валка и раската при горячей прокатке позволяет более точно определять характерные участки очага деформации и, следовательно, повысить точность определения энергосиловых параметров прокатки и управлять точностью проката.

### Библиографический список

1. *Технология прокатного производства: в 2 кн.: кн. 2* / М. А. Беняковский и др.; под ред.: В. И. Зюзина, А. В. Третьякова. — М. : Металлургия, 1991. — 862 с.
2. ГОСТ 19903 – 74 *Сталь листовая горячекатаная. Сортамент.*
3. Ильющин, А. А. *Сопротивление материалов [Текст]* / А. А. Ильющин, В. С. Ленский. — М. : Физматгиз, 1959. — 372 с.
4. Мортон, К. Смит *Основы физики металлов [Текст]* / К. Мортон. — М. : Металлургиздат, 1962. — 456 с.
5. Лившиц, Б. Г. *Физические свойства металлов и сплавов [Текст] : учебник* / Б. Г. Лившиц. — 2-е изд., доп. и перераб. — М. : Металлургия, 1980. — 320 с.
6. Смирнов, В. С. *Теория обработки металлов давлением [Текст]* / В. С. Смирнов. — М. : Металлургия, 1973. — 496 с.
7. *Теория продольной прокатки [Текст] : учеб. для магистров Вузов* / Я. Д. Василев, А. А. Минаев. — Донецк : УНИТЕХ, 2010. — 456 с.
8. Целиков, А. И. *Теория продольной прокатки [Текст]* / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. — М. : Металлургия, 1980. — 320 с.
9. Коновалов, Ю. В. *Расчет параметров листовой прокатки [Текст]* / Ю. И. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев. — М. : Металлургия, 1986. — 432 с.
10. Целиков, А. И. *Теория расчета усилий в прокатных станах [Текст]* / А. И. Целиков. — М. : Мет-издат, 1962. — 496 с.

© Горецкий Ю. В.

© Денищенко П. Н.



*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М., к.т.н., зам. начальника сортопрокатного цеха «Стан 600» ПАО «АМК» Чичканом А. А.*

*Статья поступила в редакцию 02.11.16.*

**Горецкий Ю. В., к.т.н. Денищенко П. М. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)**

#### **УРАХУВАННЯ ПРУЖНОЇ СКЛАДОВОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ПРОКАТЦІ ВИСОКИХ РОЗКАТІВ**

*Розглянуто вплив різних технологічних параметрів на пружні властивості системи валок-розкат. Проаналізовано методики розрахунку осередку деформації з урахуванням пружного стиснення валків і постдеформаційного відновлення розкату. У розрахунку параметрів осередку деформації враховано вплив температури на зміну модуля пружності, виявлено зміну довжини дуги захоплення і товщини розкату від пружної післядії. Облік пружної складової при деформації дозволить підвищити точність розрахунків і досягти необхідних показників по точності прокату.*

**Ключові слова:** *вогнище деформації, пружна деформація, пружне відновлення розкату, точність листового прокату.*

**Goreckiy Yu. V., PhD Denishchenko P. N. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**

#### **ACCOUNTING OF ELASTIC COMPONENT OF DEFORMATION AT HIGH BREAKDOWN ROLLING**

*The influence of diverse process conditions on elastic properties of roll-breakdown system has been regarded. The design procedures of deformation zone have been analyzed considering elastic compression of rolls and postdeformed reconstruction of breakdown. The temperature effect on changing the modulus elasticity was taken into account in designing parameters, the change of contact arc length and breakdown thickness with elastic aftereffect has been determined. Accounting the elastic component at deformation allows enhancing the design accuracy and succeeded in obtaining required indexes on rolling precision.*

**Key words:** *deformation zone, elastic deformation, elastic reconstruction of breakdown, precision of sheet rolling.*