

ISSN 2309-1177

Основан в 1991 году
Переименован в 2001 г. и 2013 г.

Периодичность 4 раза в год
№ 4 (35) 2021 г.

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



«ВЕСТНИК КАРАГАНДИНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ИНДУСТРИАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА»

Главный редактор – Б. Абдрасилов
Ректор, доктор биологических наук, кандидат физико-математических наук

Раздел 1. «Металлургия»

DOI 10.53002/2021.4-2309-1177.04

МРНТИ 53.43.35

УДК 621.771

Я.Д. Василев¹, О.А. Бондаренко¹, Д.Н. Самокиш¹*Украинский государственный университет науки и технологий, Украина, Днепр
(Email:sana105oksana105@gmail.com)***Обоснование модели и определение параметров упруго-пластического очага деформации при холодной прокатке**

Предложена физически обоснованная модель упруго-пластического очага деформации при холодной прокатке, отражающая особенности и закономерности контактного взаимодействия тонкой полосы с валками. В соответствии с предложенной моделью очаг деформации при холодной прокатке состоит из трех зон (участков): упругого сжатия, пластической деформации и упругого восстановления полосы. Это позволяет учитывать совместное количественное влияние пластического обжатия полосы, упругого сжатия валков и упругих деформаций полосы, полосы при определении силового взаимодействия металла с инструментом. Для реализации модели упруго-пластического очага деформации получены корректные решения для определения: a - длины упруго-пластического контакта полосы с валками; b - относительной протяженности зон (участков) упругого сжатия и упругого восстановления полосы; c - среднего контактного нормального напряжения при холодной прокатке с учетом упругого сжатия валков и полосы.

С использованием предложенной модели исследовано влияние условий холодной прокатки и дрессировки на параметры упруго-пластического очага деформации. Установлено, что учет упругой деформации полосы, прежде всего ее упругое восстановление при дрессировке и прокатке с малыми обжатиями ($\epsilon < 0,05 - 0,10$) вызывают значительное относительное увеличение длины упруго-пластического очага деформации i ($i = \frac{l_c}{\sqrt{R\Delta h}}$), достигающее трех-семикратных величин. В этих условиях прокатки (дрессировки) протяженность зоны упругого восстановления полосы может составлять до 23-32% от всей длины упруго-пластического очага деформации. Впервые получены количественные данные об относительном приращении длины упруго-пластического очага деформации за линией соединяющей центры вращения валков (параметр $\frac{x_1}{l_c}$). Установлено, что значения этого параметра, представляющего собой сумму относительных приращений длины упруго-пластического очага деформации за линией, соединяющей центры вращения валков, вызванных упругим сжатием последних $\frac{x_{1в}}{l_c}$ и упругим восстановлением полосы $\frac{x_{1п}}{l_c}$ может достигать 0,49, но не более 0,5. Таким образом параметр $\frac{x_1}{l_c}$ является своеобразным критерием существования и устойчивости процесса холодной прокатки. Предложенные в работе решения и результаты исследований рекомендуются для использования при совершенствовании теоретических основ процесса холодной прокатки и оптимизации режимов деформации на станах холодной с учетом особенностей и закономерностей упруго-пластического взаимодействия тонкой полосы с валками.

Ключевые слова: холодная прокатка, модель упруго-пластический очаг деформации, параметр, упругое восстановление, напряжение, полоса, приращение, обжатие

Холодная полосовая прокатка осуществляется с малыми абсолютными обжатиями и с большими контактными напряжениями. В этих условиях прокатки, силовое взаимодействие тонкой полосы с валками приобретает ярко выраженный упруго-пластический характер и упругие деформации сжатия инструмента и металла приводят к значительному увеличению длины очага деформации и энергосиловых параметров процесса [1-5]. Отмеченные особенности контактного взаимодействия металла с инструментом свидетельствуют о необходимости учета влияния упругих деформаций валков и полосы при прогнозировании технологических параметров и разработке теоретических основ процесса холодной прокатки [2,3,5,6]. Проблема эта не нова и она обсуждалась ранее в литературе [1-5,7-10]. Однако большинство из предложенных решений были предназначены для определения только длины очага деформации, причем без учета влияния упругого сжатия полосы, что позволяет относить их к разряду приближенных [2,4,8]. Более корректные решения для определения длины очага деформации и остальных параметров процесса с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы и особенностей упруго-пластического взаимодействия металла с инструментом предложены в работах [3,5-7,9].

Эти решения соответствуют современному уровню развития теории холодной прокатки и, как показали результаты лабораторных и промышленных экспериментальных исследований, обеспечивают прогнозирование технологических параметров холодной прокатки с удовлетворительной точностью и надежностью [3,5-7,11]. Упруго-пластический очаг деформации имеет свои особенности, поэтому обоснование методики исследования, ее реализация, анализ и практическое применение результатов прогнозирования технологических параметров процесса холодной прокатки предполагает наличие достаточно высокой квалификации (профессионализма) у исследователей. В противном случае, как это следует из работ ученых «научной школы прокатчиков Черновецкого государственного университета», опубликованных в монографии [12] и на страницах журналов «Производство проката» и «Металлы» за последние 15-20 лет, авторы на основании результатов собственных исследований приходят к необоснованным и ошибочным выводам и заключениям о процессе холодной прокатки, например:... «о наличии двух и более нейтральных сечений в очаге деформации»; «о реализации процесса холодной прокатки без зоны опережения, или с отрицательным опережением, либо с отрицательным градиентом изменения контактных нормальных напряжений вдоль всего очага деформации»; «о том, что зона упругого восстановления полосы начинается за линией, соединяющей центры вращения валков и ее протяженность составляет более 50% от всей длины очага деформации»; «о возможности определения положения нейтрального сечения по толщине полосы без учета радиального упругого сжатия рабочих валков» и др. Эти «выводы» и «заключения» противоречат основным положениям современной теории продольной холодной прокатки, и не имеют экспериментального подтверждения [1,3,5,6,8,9]. Из изложенного следует, что научно-техническое сообщество прокатчиков не информировано или информировано недостаточно об особенностях и закономерностях упруго-пластического взаимодействия полосы с валками при холодной прокатки, поэтому устранение этого пробела актуально.

Цель работы. Настоящая работа посвящена физическому обоснованию упруго-пластического очага деформации при холодной прокатки, теоретическому определению его длины, в том числе относительной протяженности зон (участков) упругого контакта металла и инструмента и исследованию влияния упругого сжатия валков и полосы на параметры последнего.

Постановка задачи. Особенности и закономерности упруго-пластического очага деформации при холодной прокатке. Поскольку все металлы и их сплавы обладают упругими и пластическими свойствами, пластическое обжатие полосы Δh при прокатке ($\Delta h = h_0 - h_1$, где h_0 , h_1 – толщина полосы до и после прокатки) всегда сопровождается ее упругим сжатием $\Delta_{оп}$ и упругим восстановлением $\Delta_{1п}$, соответственно на входе и выходе из очага деформации. Одновременно, под действием контактных напряжений при прокатке, рабочие валки сжимаются упруго в радиальном направлении на величину $\Delta_{1в}$. Упругие деформации сжатия валков и полосы суммируясь с пластическим обжатием последней вызывают дополнительное увеличение длины, уже упруго-пластического очага деформации l_c . Исходя из такого понимания контактного взаимодействия полосы

Раздел 1. «Металлургия»

с валками на рис. 1 приведена физически обоснованная схема (модель) упруго-пластического очага деформации и соответствующая ей эпюра контактных нормальных напряжений для простого симметричного процесса холодной прокатки без учета влияния внеконтактной упругой деформации полосы [1,3,5,6,9]. Пользуясь этой схемой А.И. Целиков получил следующие уравнения (в наших обозначениях), которые точно выражают длину очага деформации при холодной прокатке с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы или длину упруго-пластического очага деформации l_c [1].

$$l_c = x_0 + x_1 = \sqrt{2R\left(\frac{\Delta h}{2} + \Delta_{1в} + \Delta_{1п}\right)} + \sqrt{2R(\Delta_{1в} + \Delta_{1п})} \quad (1)$$

$$\text{или } l_c = x_1 + \sqrt{R\Delta h + x_1^2}, \quad (2)$$

$$\text{где } x_1 = \sqrt{2R(\Delta_{1в} + \Delta_{1п})};$$

(3) R – геометрическая радиус рабочих валков.

Решение этих уравнений сводится к определению величин упругих деформаций сжатия валков $\Delta_{1в}$ и полосы $\Delta_{1п}$ или приращения длины упруго-пластического очага деформации за линией, соединяющей центры вращения валков x_1 .

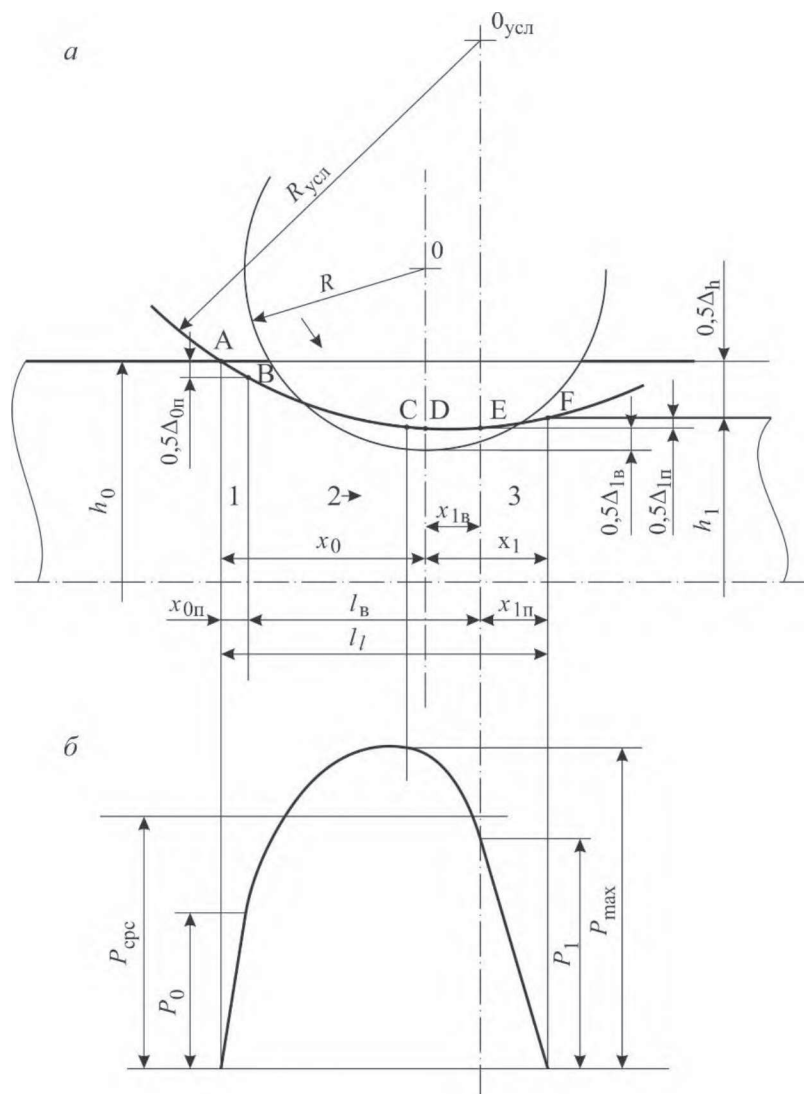


Рисунок 1 – Схема упруго-пластического очага деформации при холодной полосовой прокатке (а) и соответствующая ей теоретическая эпюра нормальных контактных напряжений (б): 0; 0_{усл} –

физический и условный центр вращения вала; q_0, q_1 – заднее и переднее напряжения натяжения; p_{max}, p_{cp} – максимальное и среднее нормальное напряжение; p_0, p_1 – нормальное напряжение на границах упруго-пластического контакта полосы с валами в зонах отставания и опережения.

Из схемы, приведенной на рисунке 1 следует, что упруго-пластический очаг деформации при холодной прокатке состоит из трех зон (участков): упругого сжатия 1, пластической деформации 2 и упругого восстановления 3 полосы, протяженностью соответственно $x_{оп}, l_b, x_{1п}$. В связи с этим, протяженность или общая длина упруго-пластического очага деформации l_c (горизонтальная проекция линий контакта полосы с валами ABCDEF) при холодной полосовой прокатке, включая ее приращение за линей, соединяющей центры вращения рабочих валков x_1 , вызванное упругим сжатием последних $x_{1в}$ и упругим восстановлением полосы $x_{1п}$, равны соответственно [1,5,6,9]:

$$x_{оп} + l_b + x_{1п} = l_c; \quad (4)$$

$$x_1 = x_{1в} + x_{1п}; \quad (5)$$

или (в относительных величинах):

$$\frac{x_{оп}}{l_c} + \frac{l_b}{l_c} + \frac{x_{1п}}{l_c} = 1; \quad (6)$$

$$\frac{x_1}{l_c} = \frac{x_{1в}}{l_c} + \frac{x_{1п}}{l_c} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{R\Delta h}{l_c^2} \right); \quad (7)$$

Принимая во внимание, что относительное приращение длины очага деформации за линей, соединяющей центры вращения валков $\frac{x_1}{l_c}$, вызванное упругим радиальным сжатием валков и упругим восстановлением полосы, согласно уравнению (7) не может быть больше 0,5 (иначе прокатки не будет!), то очевидно, что каждый из параметров $\frac{x_{оп}}{l_c}, \frac{l_b}{l_c}$ и $\frac{x_{1п}}{l_c}$ также не может превышать 0,5, причем всегда $\frac{x_{1п}}{l_c} > \frac{x_{оп}}{l_c}$ [5,6,9]. Кроме того, согласно рис. 1 пластическое обжатие (пластическая деформация) полосы заканчивается в сечении, проходящее через точку Е, т.е. за линией соединяющей центры вращения валков, причем значительно раньше выхода переднего конца последней из валков и в этом сечении она приобретает наименьшую толщину, равную $(h_1 - \Delta_{1п})$ [1,5,6,9]. На участке ЕF происходит увеличение толщины, полосы за счет ее упругого восстановления на величину $\Delta_{1п}$.

Кривая контакта полосы с валами ABCDEF на рисунке 1, как допущение, показана в виде дуги окружности, описанной условным радиусом $R_{усл}$ ($R_{усл} > R$, где R – геометрический радиус рабочих валков). В действительности линия контакта полосы с валами всегда выражается более сложной кривой, в том числе кривой с отрицательной кривизной, что подтверждено экспериментально [4,7] и теоретически [3,5,6,9,13].

В соответствии с изложенным пониманием взаимодействия полосы с валами на рисунке 1,б приведен качественный вид теоретической эпюры контактных нормальных напряжений для упруго-пластического очага деформации при холодной прокатке [5,6,9]. В зоне упругого сжатия контактные нормальные напряжения увеличиваются от 0 до p_0 , т.е. до величины достаточной для начала пластической деформации материала полосы. В зоне пластической деформации, точнее в зоне пластического отставания, нормальные напряжения продолжают расти, приобретают максимальные значения p_{max} вблизи нейтрального сечения и далее убывают плавно в зоне пластического опережения до p_1 , т.е. до величины, достаточной уже только для упругой разгрузки полосы. В сечении выхода полосы из валков нормальные напряжения приобретают нулевые значения. Через $p_{ср}$ обозначено среднее контактное нормальное напряжение при холодной прокатке, рассчитанное с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы.

Методы и материалы

Раздел 1. «Металлургия»

Объектом исследования является упруго-пластический очаг деформации при холодной прокатке, определение его общей длины и протяженности участков (зон) упругого контакта металла с инструментом аналитическими методами.

В настоящее время установлено, что наиболее точные теоретические решения для определения длины упруго-пластического очага деформации при холодной прокатке получают с использованием уравнения линии контакта полосы с валками [5,6,9,14,15], либо в результате совместного решения дифференциального уравнения равновесия продольных сил, уравнениями напряженно-деформированного состояния [3]. В данной работе длину упруго-пластического очага деформации l_c определяли с использованием уравнения линии контакта полосы с валками. Общий вид формулы для расчета l_c в этом случае остается неизменным и записывается в виде (2), а влияние упругих деформаций сжатия валков и полосы учитывается при определении приращения x_1 (рис. 1,а) длины очага деформации за линией, соединяющей центры вращения валков. Уравнение линии упруго-пластического контакта полосы с валками находили в результате решения контактной задачи теории упругости Буссинеска [14,15] для описания изменения толщины полосы в очаге деформации при прокатке. Подробно это решение, как и решение для определения длины упруго-пластического очага деформации дано в работах [5,6,9,13]. Поэтому ниже приведено только уравнение для определения приращения x_1 длины упруго-пластического очага деформации этим методом при описании эпюры контактных нормальных напряжений уравнением параболы [5,6]:

$$x_1 = x_{1в} + x_{1п} = \sigma_{\text{прс}} R \frac{1-\nu_{\text{в}}^2}{\pi E_{\text{п}}} \left(1 - 2 \frac{x_{1п}}{l_c}\right) \left[4 \frac{x_{1п}}{l_c} \left(1 - \frac{x_{1п}}{l_c}\right) + 1\right] + x_{1п}, \quad (8)$$

где $\nu_{\text{в}}$, $E_{\text{в}}$ – соответственно коэффициент Пуассона и модуль упругости материала рабочих валков (Н/мм²).

Это уравнение по своей структуре соответствует уравнению (5), что свидетельствует о его физической обоснованности. Преимуществом данного уравнения является также то, что оно в явном виде учитывает влияние протяженности участка упругого восстановления полосы $x_{1п}$ на длину упруго-пластического очага деформации. Дело в том, что практически все опубликованные формулы для расчета длины очага деформации с учетом влияния упругого сжатия валков и полосы не предусматривают определения протяженности участков (зон) упругого контакта полосы с валками в явном виде, хотя такая информация необходима при решении многих научных и прикладных задач, например, при дрессировке и холодной прокатке полос с малыми обжатиями.

Используя уравнение контактной линии полосы с валками ранее получили следующие зависимости для определения относительной протяженности участков упругого восстановления $\frac{x_{1п}}{l_c}$ и упругого сжатия $\frac{x_{оп}}{l_c}$ полосы с валками при холодной прокатке [5,6,9].

$$\frac{x_{1п}}{l_c} = \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \frac{E_{\text{п}}}{\beta \sigma_{\text{т1}} \xi_1}}}, \quad (9)$$

$$\frac{x_{оп}}{l_c} = \left(1 - \frac{x_{1п}}{l_c}\right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\beta \sigma_{\text{т0}} \xi_0}{\varepsilon E_{\text{п}} + \beta \sigma_{\text{т1}} \xi_1 (1-\varepsilon)}}\right], \quad (10)$$

где

$$\xi_1 = 1 - \frac{q_1}{\beta \sigma_{\text{т1}}}; \quad (11)$$

$$\xi_0 = 1 - \frac{q_0}{\beta \sigma_{\text{т0}}} \quad (12)$$

β, ε – коэффициент Лоде ($\beta = 1,15$) и частное относительное обжатие при прокатке (доли единицы); $\sigma_{\text{т0}}, q_0, \sigma_{\text{т1}}, q_1$ – предел текучести материала полосы и напряжение натяжения последней на входе и на выходе из очага деформации соответственно, (Н/мм²).

Из (9) и (10) видно, что с уменьшением частного относительного обжатия ε при холодной прокатке относительная протяженность участков упругого восстановления $\frac{x_{1п}}{l_c}$ и упругого сжатия $\frac{x_{оп}}{l_c}$

увеличивается и при $\varepsilon \rightarrow 0$ стремятся к 0,5, причем во всем диапазоне изменения ε выполняется условие $\frac{x_{1п}}{l_c} > \frac{x_{оп}}{l_c}$. Поскольку при прокатке величина ε всегда больше нуля, то очевидно, что значения параметров $\frac{x_{1п}}{l_c}$ и $\frac{x_{оп}}{l_c}$ сумма всегда меньше 0,5. Поэтому приведенные в работе [12, стр. 81] данные о том, что общая относительная протяженность участков упругого сжатия $\frac{x_{оп}}{l_c}$ и упругого восстановления $\frac{x_{1п}}{l_c}$ полосы может достигать 0,61-0,73 и более, т.е. превышать 0,5, являются ошибочными.

Как следует из уравнения (8) приращение длины упруго-пластического очага деформации, за линией соединяющей центры вращения валков x_1 , как и вся его длина l_c , зависят от среднего контактного нормального напряжения $p_{срс}$, поэтому для их расчетного определения надо знать величину данного параметра. Принимая во внимание практически линейный характер изменения эпюры контактных нормальных напряжений на участках упругого сжатия и упругого восстановления полосы с валками (1,6) записали в общем виде следующую формулу для определения среднего контактного нормального напряжения при холодной прокатке с учетом влияния упругого сжатия валков и полосы [5,6,9]:

$$p_{срс} = \frac{1}{2} \left(p_0 \frac{x_{оп}}{l_c} + p_1 \frac{x_{1п}}{l_c} \right) + p_{срв} \frac{l_v}{l_c}, \quad (13)$$

$$p_0 = \frac{\beta \sigma_{то}}{1 - \nu_{II}^2} \xi_0; \quad (14)$$

$$p_1 = \frac{\beta \sigma_{т1}}{1 - \nu_{II}^2} \xi_1 \quad (15)$$

$p_{срв}$, l_v – среднее контактное нормальное напряжение на участке пластического контакта полосы с валками и протяженность (длина) данного участка.

Опуская промежуточные вкладки в работе [6,9] приведен окончательный вид формулы для определения среднего контактного нормального напряжения $p_{срс}$ с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы:

$$p_{срс} = \frac{\beta}{2(1 - \nu_{II}^2)} \left(\sigma_{то} \xi_0 \frac{x_{оп}}{l_c} + \sigma_{т1} \xi_1 \frac{x_{1п}}{l_c} \right) + \frac{\beta \sigma_{ср} \xi_{ср}}{1 - \nu_{II}^2} \left\{ 1 + \frac{f l_v l_v}{3 - h_{ср}} \left[1 + \left(\frac{f l_v}{4 h_{ср}} \right)^2 \right] \right\} \frac{l_v}{l_c}, \quad (16)$$

$$\xi_{ср} = 1 - \frac{q_0 + q_1}{2 \beta \sigma_{ср}}; \quad (17)$$

$$h_{ср} = 0,5(h_0 + h_1); \quad (18)$$

$\sigma_{ср}$ – среднее значение напряжения текучести материала полосы в очаге деформации, подсчитанное с учетом совместного влияния упрочнения и температурно-скоростных условий деформации, (Н/мм²); f – коэффициент трения при холодной прокатке.

Поскольку длина упруго-пластического очага деформации l_c и ее приращение x_1 за линией, соединяющей центры вращения валков зависят от среднего контактного нормального напряжения $p_{срс}$, то они являются, по существу, энергосиловыми параметрами и их расчетное определение предусматривает использование итерационной процедуры. Простейшие алгоритмы расчета l_c и остальных параметров процесса холодной прокатки с применением итерационной процедуры содержатся в работах [5,9,10].

Результаты исследования и их анализ

О структуре, уровне и характере изменения параметров упруго-пластического очага деформации при холодной прокатке судили по результатам расчетов с применением приведенных выше зависимостей. Расчеты выполняли для случаев холодной прокатки полос из стали 08кп с исходной толщиной 2,5 и 0,25 мм, моделируя тем самым условия деформации в первых и последних клетях

Раздел 1. «Металлургия»

непрерывных станов прокатки [5,9]. С этой целью частные относительные обжатия ε при прокатке и степень предварительного наклепа исходного подката $\varepsilon_{\text{пр}}$ изменяли соответственно в диапазонах от 0,01 до 0,4 и от 0 до 0,9 и принимали следующие исходные данные: $R = 300$ мм; $f = 0,04 - 0,12$; $\frac{q_0}{\beta\sigma_{T0}} = 0,15$; $\frac{q_1}{\beta\sigma_{T1}} = 0,25$; $E_B = E_{\Pi} = 2,2 \cdot 10^5$ Н/мм²; $\nu_B = \nu_{\Pi} = 0,3$; упрочнение стали 08кп описывали уравнением: $\sigma_T = 230 + 34,6(100\varepsilon_{\varepsilon})^{0,6}$. В ходе расчетов определяли: длину упруго-пластического очага деформации l_c и длину очага при прокатке жестко-пластической полосы в идеально жестких валках $l(l = \sqrt{R\Delta h})$, относительную протяженность участков (зон) упругого ($\frac{x_{1п}}{l_c}, \frac{x_{оп}}{l_c}$) и пластического ($\frac{x_{1в}}{l_c}, \frac{l_{в}}{l_c}$) контактов полосы с валками, относительное приращение длины упруго-пластического очага деформации за линией, соединяющей центры вращения валков $\frac{x_1}{l_c}$ и относительное увеличение длины упруго-пластического очага деформации i ($i = \frac{l_c}{l}$) в результате учета влияния упругих деформаций валков и полосы. Для большей наглядности и удобства анализа использовали табличный способ представления полученных данных, часть из которых дана в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что относительная протяженность участков упругого сжатия $\frac{x_{оп}}{l_c}$ и упругого восстановления $\frac{x_{1п}}{l_c}$ приобретает наибольшие значения, равные соответственно 0,0363 и 0,233 при холодной прокатке с относительным обжатием 0,01 ненаклепанных полос ($\varepsilon_{\text{пр}} = 0$), т.е. при дрессировке. С увеличением степени предварительного обжатия прокатываемых полос до 0,9 значения параметров $\frac{x_{оп}}{l_c}$ и $\frac{x_{1п}}{l_c}$ при $\varepsilon = 0,01$ увеличиваются соответственно до 0,0935 и 0,321 в результате увеличения предела текучести материала полосы. Таким образом, увеличение предела текучести материала полосы с 230 до 744 Н/мм² приводит к увеличению суммарной относительной протяженности участков упругого контакта полосы с валками $\frac{x_{оп}}{l_c}$ и $\frac{x_{1п}}{l_c}$ с 0,2693 до 0,4145 или более чем в 1,5 раза. При этом увеличение суммарной относительной протяженности этих участков происходит исключительно за счет упругого восстановления полосы. Видно также, что общая относительная протяженность участков $\frac{x_{оп}}{l_c}$ и $\frac{x_{1п}}{l_c}$ с увеличением частного относительного обжатия уменьшается и при $\varepsilon = 0,10 - 0,15$ и $\varepsilon > 0,20 - 0,25$, обычно не превышает соответственно 0,10-0,12 и 0,05-0,07. В соответствии с описанным характером изменения параметров $\frac{x_{оп}}{l_c}$ и $\frac{x_{1п}}{l_c}$ изменяется и параметр i с увеличением частного относительного обжатия. Например, если значения параметра i при прокатке полосы толщиной 0,25 мм из ненаклепанной стали 08кп с увеличением частного относительного обжатия от 0,01 до 0,4 уменьшается с 2,89 до 1,47 или чуть меньше чем в два раза, то при прокатке предварительно наклепанной полосы ($\varepsilon_{\text{пр}} = 0,9$) той же толщины значения параметра i уменьшаются уже с 7,10 до 1,97 или в 3,6 раза, что свидетельствует о сильном влиянии упругих деформаций валков и полосы на длину упруго-пластического очага деформации в данных условиях холодной прокатки.

Как следует из приведенных данных учет влияния упругих деформаций полосы приводит к значительному увеличению длины упруго-пластического очага деформации прежде всего при дрессировке и холодной прокатке с небольшими частными относительными обжатиями ($\varepsilon < 0,1$). При прокатке с обжатиями более 0,1 основное влияние на длину упруго-пластического очага деформации оказывает уже участок (зона) пластического обжатия полосы, о чем свидетельствуют большие значения параметра $\frac{l_{в}}{l_c}$, достигающие 0,85-0,95. В этих условиях прокатки превалирующее влияние на длину упруго-пластического очага деформации при холодной прокатке оказывают упругие уже деформации радиального сжатия рабочих валков, что подтверждается более низкими значениями параметра i (обычно $i < 1,5 - 2,5$). Формирование структуры и протяженности упруго-пластического очага деформации зависит также от относительного приращения его длины за линией, соединяющей центры вращения валков $\frac{x_1}{l_c}$, вызываемого упругим радиальным сжатием рабочих валков $\frac{x_{1в}}{l_c}$ и упругим восстановлением полосы $\frac{x_{1п}}{l_c}$. Величина параметра $\frac{x_1}{l_c}$ при дрессировке и прокатке с малыми относительными обжатиями определяется исключительно упругим восстановлением полосы и может увеличиваться до 0,34-0,49, но не более 0,5. С увеличением частного относительного обжатия до 0,2-0,4

величина параметра $\frac{x_1}{l_c}$ уменьшается, но продолжает оставаться на высоком уровне (до 0,289-0,371), только в этом случае приращение длины очага деформации за линией соединяющей центры вращения валков формируется уже преимущественно за счет упругого сжатия валков ($\frac{x_{1в}}{l_c} = 0,213 - 0,309$).

Выводы

1. Предложена физически обоснованная модель упруго-пластического очага деформации при холодной полосовой прокатке, отражающая особенности и закономерности контактного взаимодействия тонкой полосы с валками и определены его параметры. В соответствии с предложенной моделью упруго-пластический очаг деформации при холодной прокатке состоит из трех зон (участков): упругого сжатия, пластической деформации и упругого восстановления полосы, что позволяет учитывать совместное количественное влияние пластического обжатия полосы и упругого сжатия валков и полосы при определении силового взаимодействия металла с инструментом. Модель предназначена для практического применения при прогнозировании технологических параметров и разработке теоретических основ процесса холодной прокатки.

Таблица 1 – Расчетные значения параметров упруго-пластического очага деформации при холодной прокатке полос из стали 08кп в валках диаметром 600 мм

№	Параметр	Числовые значения параметра при холодной прокатке											
		Исходная толщина полосы 2,5 мм, $\epsilon_{пр} = 0; f = 0,12$				Исходная толщина полосы 0,25 мм, $\epsilon_{пр} = 0; f = 0,04$				Исходная толщина полосы 0,25 мм, $\epsilon_{пр} = 0,9; f = 0,04$			
		Частное относительное обжатие, ϵ				Частное относительное обжатие, ϵ				Частное относительное обжатие, ϵ			
		0,01	0,10	0,20	0,40	0,01	0,10	0,20	0,40	0,01	0,10	0,20	0,40
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	$h_1, \text{ мм}$	2,475	2,25	2,00	1,50	0,2475	0,225	0,20	0,15	0,2475	0,225	0,200	0,15
2	$\Delta h, \text{ мм}$	0,025	0,25	0,50	1,00	0,0025	0,025	0,05	0,10	0,0025	0,025	0,05	0,10
3	$\sigma_{то}, \text{ Н/мм}^2$	230	230	230	230	230	230	230	230	744	744	744	744
4	$\sigma_{т1}, \text{ Н/мм}^2$	264	368	439	546	264	367	439	546	745	748	751	758
5	$l = \sqrt{R\Delta h}, \text{ мм}$	2,74	8,66	12,25	17,32	0,86	2,74	3,87	5,48	0,86	2,74	3,87	5,48
6	$x_{оп}/l_c$	0,0363	0,0045	0,0023	0,0012	0,0363	0,0045	0,0023	0,0012	0,0935	0,0140	0,0074	0,0038
7	$x_{1п}/l_c$	0,233	0,102	0,076	0,053	0,233	0,102	0,076	0,053	0,321	0,138	0,097	0,062
8	$x_{1в}/l_c$	0,105	0,084	0,079	0,078	0,207	0,213	0,213	0,214	0,169	0,301	0,307	0,309
9	x_1/l_c	0,338	0,186	0,154	0,131	0,440	0,315	0,289	0,267	0,490	0,439	0,404	0,371
10	$l_c, \text{ мм}$	4,82	10,93	14,73	20,17	2,50	4,51	5,89	8,04	6,15	7,84	8,87	10,80
11	l_b/l_c	0,729	0,893	0,921	0,945	0,729	0,893	0,921	0,945	0,585	0,847	0,895	0,933
12	$l_b, \text{ мм}$	3,51	9,76	13,57	19,05	1,82	4,03	5,42	7,59	3,59	6,64	7,94	10,07
13	$p_{срс}, \text{ Н/мм}^2$	233	357	468	616	238	374	474	676	655	931	1057	1303
14	$i = l_c/l$	1,76	1,26	1,20	1,16	2,89	1,65	1,52	1,47	7,10	2,86	2,29	1,97

2. Для реализации модели упруго-пластического очага деформации при холодной прокатке, с использованием уравнения линии контакта полосы с валками, полученного в результате решения контактной задачи теории упругости Буссинеска о перемещениях на границе упругого полупространства, предложены новые корректные решения для определения:

- длины упруго-пластического очага деформации с учетом совместного влияния пластического обжатия полосы и упругого сжатия валков и полосы, при описании распределения нормальных контактных напряжений уравнением параболы;
- относительной протяженности зон (участков) упругого сжатия и упругого восстановления полосы;
- среднего контактного нормального напряжения при холодной прокатке с учетом влияния упругих деформаций сжатия валков и полосы.

3. С использованием предложенной модели исследовано влияние условий дрессировки и холодной прокатки в первых и последних клетях непрерывных станов на параметры упруго-пластического очага деформации. Результаты моделирования показали, что модель работоспособна во всем диапазоне условий реализации процессов дрессировки и холодной прокатки. Установлено, что основное влияние на длину упруго-пластического очага деформации при холодной прокатке оказывают частное относительное обжатие полосы, упругие деформации радиального сжатия рабочих валков и упругие деформации полосы. Упругие деформации полосы, в основном ее упругое восстановление, вызывают значительное увеличение длины упруго-пластического очага деформации только при дрессировке и при холодной прокатке с малыми обжатиями ($\varepsilon < 0,10$), о чем свидетельствуют большие значения параметра i ($i = 2,89 - 7,10$).

4. Впервые получены количественные данные об относительном приращении длины упруго-пластического очага деформации за линией, соединяющей центры вращения валков (параметр $\frac{x_1}{l_c}$). Установлено, что величина этого параметра представляющего собой сумму относительных приращений длины упруго-пластического очага за линией, соединяющей центры вращения валков, вызванных упругим сжатием последней $\frac{x_{1в}}{l_c}$ и упругим восстановлением полосы $\frac{x_{1п}}{l_c}$, не может превышать 0,5 и является своеобразным критерием существования процесса холодной прокатки.

Список литературы

1. Целиков А.И. Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1970. – 358 с.
2. Третьяков А.В. Теория, расчет и исследования станов холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1966. – 255 с.
3. Полухин В.П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов. – М.: Металлургия, 1972. – 512 с.
4. Крейндин Н.Н. Расчет обжатий при прокатке цветных металлов. – М.: Металлургиздат, 1963. – 407 с.
5. Василев Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1995. – 368 с.
6. Василев Я.Д. Основы теории продольной холодной прокатки. Пластическая деформация металлов. Коллективная монография. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – С. 107-125.
7. Полухин П.И., Николаев В.А., Полухин В.П. и др. Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке. – М.: Металлургия, 1974. – 200 с.
8. Роберте В. Холодная прокатка стали: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1982. – 544 с.
9. Василев Я.Д. Теория продольной прокатки. Учебник для магистров вузов. – Донецк: УНИТЕХ, 2010. – 456 с.
10. Василев Я.Д. Единая методика расчета энергосиловых и температурно-скоростных параметров процесса холодной полосовой прокатки//Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация», 2014. - №1.- С. 50-85.

Раздел 1. «Металлургия»

11. Василев Я.Д. Экспериментальная проверка точности и работоспособности единой методики расчета энергосиловых и температурно-скоростных параметров процесса холодной прокатки // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация», 2014. - №2. - С. 05-13.
12. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология). – М.:ОАО «Черметинформация»: Череповец: ГОУ ЧГУ, 2004. – 416 с.
13. Василев Я.Д. Исследование контактной линии с валком при холодной прокатке полосы//Изв. АН СССР. Металлы, 1987. - № 5. – С. 116-126.
14. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М.: Высшая школа, 1968. – 512 с.
15. Шевченко К.Н. Основы математических методов в теории обработки металлов давлением. – М.: Высшая школа, 1970. – 351 с.

Vasilev Ya. D., Bondarenko O.A., Samokysh D.N.

Substantiation of the model and determination of the parameters of the elastic-plastic deformation zone during cold rolling

A physically substantiated model of an elastic-plastic deformation zone during cold rolling is proposed, reflecting the features and regularities of the contact interaction of a thin strip with rolls. In accordance with the proposed model, the deformation zone during cold rolling consists of three zones (sections): elastic compression, plastic deformation, and elastic recovery of the strip. This makes it possible to take into account the joint quantitative effect of the plastic reduction of the strip, the elastic compression of the rolls and the elastic deformations of the strip, strip when determining the force interaction of the metal with the tool. To implement the model of the elastic-plastic deformation zone, the correct solutions were obtained to determine: a - the length of the elastic-plastic contact of the strip with the rolls; b - the relative length of zones (sections) of elastic compression and elastic recovery of the strip; c - average contact normal stress during cold rolling, taking into account the elastic compression of the rolls and strip.

Using the proposed model, the influence of cold rolling and tempering conditions on the parameters of the elastic-plastic deformation zone is investigated. It was found that taking into account the elastic deformation of the strip, first of all, its elastic recovery during tempering and rolling with small reductions ($\varepsilon < 0,05 - 0,10$) cause a significant relative increase in the length of the elastic-plastic deformation zone i ($i = \frac{l_c}{\sqrt{R\Delta h}}$), reaching three to seven times the value.

Under these rolling (tempering) conditions, the length of the elastic recovery zone of the strip can be up to 23-32% of the entire length of the elastic-plastic deformation zone. For the first time, quantitative data were obtained on the relative increment in the length of the elastic-plastic deformation zone behind the line connecting the centers of rotation of the rolls (параметр $\frac{x_1}{l_c}$). It was found that the values of this parameter, which is the sum of the relative increments of the length of the elastic-plastic deformation zone behind the line connecting the centers of rotation of the rolls caused by elastic compression of the latter $\frac{x_{1B}}{l_c}$ and elastic recovery of the strip $\frac{x_{1B}}{l_c}$, can reach 0,49, but not more than 0,5. So, the parameter $\frac{x_1}{l_c}$ is a kind of criterion for the existence and stability of the cold rolling process. The solutions and research results proposed in this work are recommended for use in improving the theoretical foundations of the cold rolling process and optimizing deformation modes in cold mills, taking into account the features and patterns of elastic-plastic interaction of a thin strip with rolls.

Keywords: cold rolling, model of elastic-plastic deformation zone, parameter, elastic recovery, stress, strip, increment, reduction

Модельді негіздеу және суық илектеу кезінде деформацияның серпімді-пластикалық фокусының параметрлерін анықтау

Суық илектеу кезінде деформацияның серпімді-пластикалық фокусының физикалық негізделген моделі ұсынылған, ол жұқа жолақтың орамдармен жанасу әсерлесуінің ерекшеліктері мен заңдылықтарын көрсетеді. Ұсынылған модельге сәйкес суық илектеу кезіндегі деформация ошағы үш аймақтан (участкелерден) тұрады: серпімді сығымдау, пластикалық деформация және жолақты серпімді қалпына келтіру. Бұл металдың құралмен күштік өзара әрекеттесуін анықтау кезінде жолақтың пластикалық қысылуының, орамдардың серпімді қысылуының және жолақтың серпімді деформациясының, жолақтың бірлескен сандық әсерін ескеруге мүмкіндік береді. Деформацияның серпімді-пластикалық ошағының моделін іске асыру үшін мыналарды анықтау үшін дұрыс шешімдер алынды: а - жолақтың білікшелермен серпімді байланысының ұзындығы; б - жолақтың серпімді сығылуы мен серпімді қалпына келу аймақтарының (участкелерінің) салыстырмалы ұзындығы; в - орамдар мен жолақтардың серпімді сығылуын ескере отырып, суық илектеу кезіндегі орташа қалыпты байланыс кернеуі.

Ұсынылған модельді қолдана отырып, суық илектеу және жаттығу жағдайларының деформацияның серпімді-пластикалық фокусының параметрлеріне әсері зерттелді. Жолақтың серпімді деформациясын есепке алу, ең алдымен оның кіші қысқыштармен ($\varepsilon < 0,05-0,10$) жаттығу және илемдеу кезінде серпімді қалпына келуі деформацияның серпімді-пластикалық фокусының ұзындығының едәуір салыстырмалы ұлғаюына әкелетіні анықталды i ($i = l_c / \sqrt{r \Delta h}$), үш-жеті есеге жетеді. Бұл илемдеу (жаттықтыру) жағдайында жолақты серпімді қалпына келтіру аймағының ұзындығы деформацияның серпімді-пластикалық фокусының бүкіл ұзындығының 23-32% дейін болуы мүмкін. Алғаш рет орамдардың айналу орталықтарын қосатын сызықтың артында деформацияның серпімді-пластикалық фокусының ұзындығының салыстырмалы өсуі туралы сандық мәліметтер алынды (x_{l/l_c} параметрі). Соңғы x_{lv/l_c} серпімді қысылуынан және x_{lp/l_c} жолағының серпімді қалпына келуінен туындаған орамдардың айналу орталықтарын қосатын сызықтың артындағы серпімді-пластикалық деформация ошағының ұзындығының салыстырмалы өсуінің қосындысы болып табылатын осы параметрдің мәні 0,49-ға жетуі мүмкін, бірақ 0,5-тен аспайды. Осылайша, x_{l/l_c} параметрі суық илектеу процесінің болуы мен тұрақтылығының өзіндік өлшемі болып табылады. Жұмыста ұсынылған шешімдер мен зерттеу нәтижелері жұқа жолақтың орамдармен серпімді-пластикалық әрекеттесуінің ерекшеліктері мен заңдылықтарын ескере отырып, суық илектеу процесінің теориялық негіздерін жетілдіруде және суық диірмендерде деформация режимдерін оңтайландыруда қолдану ұсынылады.

Түйінді сөздер: суық илектеу, деформацияның серпімді-пластикалық фокусы, параметр, серпімді қалпына келтіру, кернеу, жолақ, өсу, қысу.

Reference

1. Tselikov A.I. (1970). *Teoriya prokatki*. Metallurgiya.
2. Tretyakov A.V. (1966). *Teoriya, raschet i issledovaniya stanov holodnoy prokatki*. Metallurgiya.
3. Poluhin V.P. (1972). *Matematicheskoe modelirovanie i raschet na EVM listovyih prokatnyih stanov*. Metallurgiya.
4. Kreyndlin N.N. (1963). *Raschet obzhatiy pri prokatke tsvetnyih metallov*. Metallurgizdat.

Раздел 1. «Металлургия»

5. Vasilev Ya.D. (1995). *Inzhenernyie modeli i algoritmyi rascheta parametrov holodnoy prokatki*. Metallurgiya.
6. Vasilev Ya.D. (2014). *Osnovyi teorii prodolnoy holodnoy prokatki. Plasticheskaya deformatsiya metallov*. Kollektivnaya monografiya. Aktsent.
7. Poluhin P.I., Nikolaev V.A., Poluhin V.P. i dr. (1974). *Kontaktnoe vzaimodeystvie metalla i instrumenta pri prokatke*. Metallurgiya.
8. Roberts V. (1982). *Holodnaya prokatka stali*. Metallurgiya.
9. Vasilev Ya.D. (2010). *Teoriya prodolnoy prokatki*. UNITEH.
10. Vasilev Ya.D. (2014). Edinaya metodika rascheta energosilovyih i temperaturno-skorostnyih parametrov protsessa holodnoy polosovoy prokatki. *Chernaya metallurgiya: Byul. in-ta «Chermetinformatsiya»*, 1, 50-85.
11. Vasilev Ya.D. (2014). Eksperimentalnaya proverka tochnosti i rabotosposobnosti edinoy metodiki rascheta energosilovyih i temperaturno-skorostnyih parametrov protsessa holodnoy prokatki. *Chernaya metallurgiya: Byul. in-ta «Chermetinformatsiya»*, 2, 05-13.
12. Garber E.A. (2004). *Stanyi holodnoy prokatki (teoriya, oborudovanie, tehnologiya)*. OAO «Chermetinformatsiya».
13. Vasilev Ya.D. (1987). Issledovanie kontaktnoy linii s valkom pri holodnoy prokatke polosyi. *Izv. AN SSSR. Metallyi*, 5, 116-126.
14. Bezuhov N.I. (1968). *Osnovyi teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti*. Vysshaya shkola.
15. Shevchenko K.N. (1970). *Osnovyi matematicheskikh metodov v teorii obrabotki metallov davleniem*. Vysshaya shkola.