

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**Институт металлургии  
и материаловедения  
им. А.А. Байкова РАН**

**80 лет**

Москва

ИМЕТ РАН

2018 г.

**УДК 669.1; 546.1; 546.3**

Институт металлургии материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 80 лет.  
Сборник научных трудов.  
М.: Интерконтакт Наука, 2018, 644 с.

ISBN 978-5-902063-58-2

Сборник подготовлен в связи с 80-летием создания Института Металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук. В статьях содержатся материалы по основным направлениям научной деятельности в области металлургии черных, цветных и редкоземельных металлов, материаловедения металлических, керамических, нанокристаллических, композиционных материалов, развития методов исследования состава, структуры и свойств материалов.

Материалы сборника могут представлять интерес для ученых и сотрудников научно-исследовательских и учебных институтов и университетов, промышленных предприятий, работающих в области металлургии черных, цветных и редких металлов, материаловедения неорганических материалов и методов исследования.

*Редакционная коллегия*

Академик К.А. Солнцев (ответственный редактор), академик О.А. Банных (зам. Ответственного редактора), академик В.М. Бузник, академик В.М. Иевлев, академик Ю.В. Цветков, чл.-корр. РАН М.И. Алымов, чл.-корр. РАН С.М. Баринов, чл.-корр. РАН Г.С. Бурханов, чл.-корр. РАН Григорович К.В., чл.-корр. РАН А.Г. Колмаков, чл.-корр. РАН В.С. Комлев, д.ф.-м.н. С.В. Симаков, к.т.н. О.Н. Фомина (ответственный секретарь)

ISBN 978-5-902063-58-2

© ИМЕТ РАН, 2018

## **Знакопеременная упруго-пластическая деформация как инструмент воздействия на механические свойства листового металла**

*А.Е. Шелест, В.С. Юсупов, М.М. Перкас, Е.Н. Шефтель,  
К.Э. Акоюн, В.В. Просвирнин*

DOI: 10.30791/978-5-902063-58-2-187-216

Повышение прочностных свойств металлов и сплавов издревле осуществляется путем энергетического воздействия на заготовку или готовое изделие. К основным видам такого воздействия относятся термическое и деформационное.

Суть первого, в самых общих чертах, состоит в создании за счет контролируемого нагрева и охлаждения условий для существования более прочных, но зачастую метастабильных, фаз или дисперсионных выделений при температуре эксплуатации металлов и сплавов. Термическое воздействие возможно и эффективно в материалах, которым присущ полиморфизм или температурный градиент растворимостей, кроме того, такое воздействия зачастую приводит к нежелательным последствиям, например к окислению, изменению геометрии, появлению трещин и т.п.

Деформационное воздействие, главным образом, заключается в создании дополнительных препятствий движению дислокаций за счёт увеличения числа дефектов кристаллической структуры или их перегруппировки (наклёп). Как правило, такое упрочнение осуществляется без подвода внешнего тепла и сопровождается существенным формоизменением, что ограничивает возможность целенаправленного и контролируемого воздействия на готовую, в частности листовую, продукцию.

В обработке металлов давлением широко используются технологические процессы, ориентированные на деформацию без нагрева заготовок и обеспечивающие в изделиях и полуфабрикатах повышенные прочностные характеристики, точность их размеров и высокое качество поверхности. К числу отмеченных процессов относятся, например, прокатка тонких листов и лент, листовая штамповка, чеканка, волочение проволоки, прутков и труб и т.п. При этом становится актуальной задача прогнозирования свойств металлов и сплавов в операциях холодной пластической деформации.

На наш взгляд, интересной представляется возможность управления механическими свойствами уже готового изделия посредством

знакопеременной деформации, практически не изменяющей его геометрию. В работе [1], в частности, была сформулирована возможность использования процесса правки листа на роликотправильных машинах в качестве инструмента осуществления контролируемой знакопеременной деформации металлических материалов с целью управления их механическими и функциональными свойствами. Однако перед проведением экспериментов по проверке этого предположения пришлось решать ряд методических вопросов.

Одним из таких вопросов является подход к определению относительной деформации листа при обработке на роликотправильной машине.

Принцип правки на роликотправильных машинах основан на растяжении сжатых волокон листа. При этом искривленные участки многократно изгибаются и перегибаются в обратную сторону, вследствие чего длины волокон металла выравниваются, а сами искривления уменьшаются [2]. На рис. 1 воспроизведена схема указанного воздействия, когда оси верхней и нижней групп роликов листопрямительной машины находятся в разных плоскостях, наклоненных друг к другу таким образом, что в направлении движения листа они образуют расширяющуюся щель.

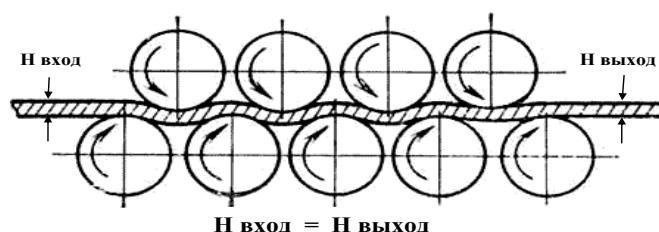


Рис.1. Схема прохождения листа через роликотправильную машину

Вопросы моделирования процесса правки листа на роликотправильных машинах рассматриваются в работах [3-6]. Знакопеременная деформация при изгибе, как свидетельствует, например, работа [7], оказывает заметное влияние на свойства низколегированных трубных сталей классов прочности К56-К65. Тем самым становится многообещающей перспективой возможность использования листопрямительных машин в качестве инструмента многократного знакопеременного деформационного воздействия для управления свойствами металлического листа.

При изгибе листа толщиной  $H$  при частичном контакте с поверхностью ролика диаметром  $D$  реализуется схема, приведенная на рис. 2. В этом случае величина поверхности контакта характеризуется

центральный углом  $\alpha$ , а длины наружного и внутреннего волокон на поверхностях листа будут равны:

$$a'b' = \frac{2\pi(R_{\text{крив}} + 0,5H)\alpha}{360}; \quad a''b'' = \frac{2\pi(R_{\text{крив}} - 0,5H)\alpha}{360};$$

длина нейтральной линии составит  $ab = \frac{2\pi R_{\text{крив}} \alpha}{360}$ . В

рассматриваемом случае радиус кривизны нейтральной линии листа будет равен  $R_{\text{крив}} = 0,5D + 0,5H$ . Относительные деформации удлинения (для наружного волокна) и укорочения (для внутреннего волокна) определяются из соотношений:

$$\varepsilon_{\text{нар}} = \frac{a'b' - ab}{ab} 100\%; \quad \varepsilon_{\text{вн}} = \frac{a''b'' - ab}{ab} 100\%,$$

подставляя в которые выше приведенные выражения для  $ab, a'b', a''b''$ , после преобразований получаем:

$$\varepsilon_{\text{нар}} = \frac{H}{2R_{\text{крив}}} 100\%; \quad \varepsilon_{\text{вн}} = -\frac{H}{2R_{\text{крив}}} 100\% . \quad (1)$$

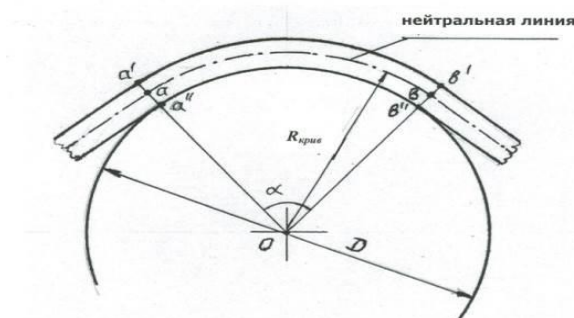


Рис.2. Схема изгиба листа на ролике при частичном контакте

Кроме относительных линейных деформаций процесс формоизменения при обработке металлов давлением можно оценивать истинными (логарифмическими) деформациями, которые особенно удобны, когда деформации накапливаются. Для рассматриваемой схемы изгиба листа на ролике для наружного и внутреннего волокон истинные деформации растяжения и сжатия составят:

$$e_{\text{нар}} = \ln \frac{a'b'}{ab} = \ln \frac{R_{\text{крив}} + 0,5H}{R_{\text{крив}}}; \quad e_{\text{вн}} = \ln \frac{a''b''}{ab} = \ln \frac{R_{\text{крив}} - 0,5H}{R_{\text{крив}}} .$$

(2)

Из полученных соотношений (1) и (2) следует, что при изгибе листа на цилиндрической поверхности роликов относительные деформации волокон зависят только от радиуса кривизны нейтральной линии и толщины листа и не зависят от протяженности поверхности контакта, характеризуемой углом  $\alpha$ . Отметим еще раз, что в роликовых листопрямительных машинах правка производится по схеме знакопеременного изгиба с увеличением расстояния между верхним и нижним рядами роликов от входа к выходу. Для этого машины конструктивно выполнены таким образом, что верхние и нижние рабочие ролики, располагающиеся в шахматном порядке и непосредственно воздействующие на лист при правке, вместе с опорными роликами заключены в кассеты, угол наклона друг к другу регулируется установкой межцентрового расстояния  $E$  между рабочими роликами раздельно со стороны входа и со стороны выхода с помощью нажимных устройств, оборудованных цифровыми указателями расстояния  $G$  между плоскостями, касательными к образующим верхних и нижних рабочих роликов.

Для точной настройки цифровых указателей предлагается способ определения фактической величины  $G$  при полном касании верхних и нижних рабочих роликов с известным межосевым расстоянием  $L$ , как это представлено на рис. 3. В общем виде

$$E = D + G, \quad (3)$$

где  $E$  – межцентровое расстояние между верхними и нижними рабочими роликами;  $D$  – диаметр рабочих роликов. Что же касается параметра  $G$ , то если  $G > 0$ , то назовем его *зазором*, а если  $G < 0$ , то назовем его *перекрытием*. В соотношение (3) входят две неизвестные величины  $E$  и  $G$ . Для их определения воспользуемся тем, что  $E$  равно катету  $AF$  прямоугольного треугольника  $ACF$ , гипотенуза которого  $AC$  равна  $D$ ; следовательно

$$E = \sqrt{D^2 - (0,5L)^2}. \quad (4)$$

Из соотношений (3) и (4) получаем величину перекрытия при полном касании валков

$$G = -D + \sqrt{D^2 - (0,5L)^2}. \quad (5)$$

Возвращаясь собственно к процессу правки листа, рассмотрим один гипотетический случай полного касания листом роликов правильной машины, представленный на рис. 4. Полное касание листом роликов происходит только при условии, когда расстояние между центрами роликов противоположных рядов равно  $D + H$  (длина отрезка  $AB$ ). В этом случае из

геометрических соотношений в треугольниках  $ACF$  и  $Aac$  получаем выражение для определения величины перекрытия  $G$ , обеспечивающей предлагаемый вариант:

$$G = -D + (D + H) \cos \left[ \arcsin \left( \frac{L}{2(D + H)} \right) \right]. \quad (6)$$

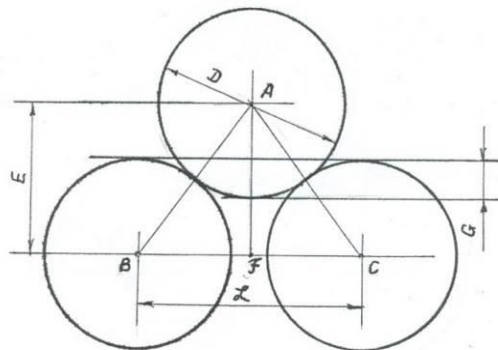


Рис.3. Положение рабочих роликов при их полном касании

При этом относительные деформации внешних и внутренних волокон листа будут определяться из соотношений (1) и (2), а радиус кривизны будет равен  $R_{\text{крив}} = 0,5D + 0,5H$ .

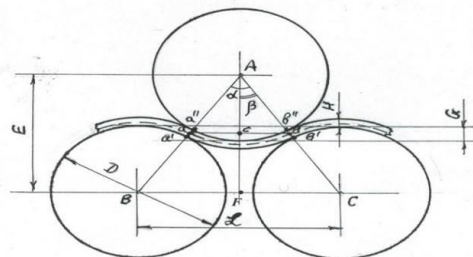


Рис.4. Полное касание листом роликов листопрямительной машины

Остается рассмотреть наиболее вероятный случай изгиба, когда контакт листа с роликами происходит не по площадке, а в точке, как это предлагается в [6], за исключением того, что углы  $\varphi$  точек касания листа и роликов полагаем равными нулю. Аналогом такой картины является изгиб балки на двух опорах под действием сосредоточенной нагрузки,

приложенной на середине расстояния между опорами. Соответствующая схема представлена на рис. 5 для варианта, когда между плоскостями, касательными к образующим верхнего и нижнего рядов роликов, имеется перекрытие  $G$ , причем  $G \leq 0$ . На рис. 5 изображена в виде кривой часть нейтральной линии, состоящая из двух дуг ( $ac$  и  $cd$ ), имеющих в точке  $c$  общую касательную. Центр дуги изгиба  $ac$  находится в точке  $K$  пересечения прямой, проходящей через точки  $A$  и  $F$ , и перпендикуляра к хорде  $abc$ , восстановленного из её середины (из точки  $b$ ), а длина радиуса кривизны  $Ka$  определится из треугольников  $aed$  и  $Kab$ . В результате получаем:

$$R_{\text{крив}} = \frac{\sqrt{(0,5L)^2 + (H - G)^2}}{4 \cos \left[ \arctg \frac{L}{2(H - G)} \right]}. \quad (7)$$

Аналогичное выражение для радиуса кривизны получается и в случае, когда между плоскостями, касательными к образующим верхнего и нижнего рядов роликов, имеется зазор  $G \geq 0$ . Таким образом, в соотношение (7) величина  $G$  вставляется со знаком «минус» при перекрытии и со знаком «плюс» при зазоре.

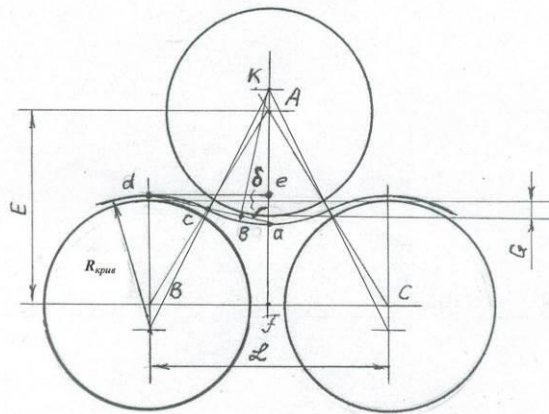


Рис.5. Схема изгиба листа между роликами в случае точечного контакта

Эксперименты по знакопеременному изгибу листов проводили на прецизионной правильной машине ARKU25/21 (модель EcoMaster2550) с рабочими роликами диаметром  $D = 25$  мм при расстоянии между их центрами  $L = 28$  мм. В верхней кассете установлено 10 рабочих роликов, а в нижней – 11. Машина предназначена для правки листов толщиной от 0,25 до 3,0 мм. Положение нажимных винтов на входе и выходе выводится на цифровые индикаторы с точностью  $\pm 0,01$  мм.



Положение нажимных винтов зависит в первую очередь от толщины пропускаемого листа и устанавливается с помощью номограммы (входит в комплект документов на правильную машину), в которой учитываются дополнительно конструктивные особенности машины, а так же механические свойства её рабочих элементов. Ниже в таблице 1, в качестве примера, приводятся установки нажимных винтов выборочно для четырех толщин листа. Наибольшее перекрытие при полном касании роликов (рис. 3), определяемое из соотношения (5), составило  $G = - 4,29$  мм. Именно это значение  $G$  рекомендуется использовать при тарировке индикаторов нажимных винтов.

*Таблица 1*

Установки нажимных винтов правильной машины ARKU25/21

Толщина полосы, мм	Установки, мм	
	на входе <sup>*)</sup>	на выходе
3,0	От 2,8 до 2,25	3,0
2,0	От 1,7 до 1,05	2,0
1,0	От 0,45 до - 0,4	1,0
0,25	От - 0,8 до - 2,15	0,25

(\*) Бóльшее значение относится к мягким металлам, а меньшее – к более твёрдым

В экспериментах по знакопеременному изгибу использовался лист толщиной 1,4 мм. При касании листа поверхности рабочих роликов его относительные деформации определяли с помощью соотношений (1) и (2) и в итоге получили:

для наружных волокон  $\varepsilon_{изг} = 5,3 \%$ ;  $e_{нар} = 0,0517$ ;

для внутренних волокон  $\varepsilon_{вн} = - 5,3 \%$ ;  $e_{вн} = - 0,0545$ .

При условии полного касания листа поверхности роликов (рис. 4) перекрытие в соответствии с соотношением (6) должно было составлять  $G = - 2,61$  мм. Задаваемый же номограммой интервал установки нажимных винтов на входе в правильную машину составлял зазор  $G$  от 0,9 до 0,2 мм. При проведении экспериментов на выходе был установлен постоянный зазор, равный толщине листа 1,4 мм, а на входе зазор между роликами постепенно уменьшался, переходя в перекрытие, причем максимальное перекрытие составило  $G = - 1,78$  мм. При дальнейшем повышении перекрытия не обеспечивались условия захвата листа роликами и процесс правки невозможно было осуществлять.

Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что гипотетический случай полного касания листом роликов правильной машины

на практике не может быть реализован. Но это не исключает возможности знакопеременной деформации листа на правильной машине при частичном касании, так как величина площади поверхности контакта не влияет на величины относительных деформаций волокон листа, определяемых соотношениями (1) и (2). В случае же точечного контакта радиус кривизны нейтральной линии листа будет определяться из соотношения (7) и будет расти с увеличением  $G$ . Были выполнены расчеты радиуса кривизны  $R_{крив}$ , наибольшей относительной деформации растяжения  $\varepsilon_{нар}$ , наибольшей истинной деформации растяжения  $e_{нар}$  и кривизны нейтральной линии листа

$\rho = \frac{1}{R_{крив}}$  для различных значений  $G$  от  $-1,78$  до  $1,4$  мм. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Заметим, что для минимального значения зазора  $G = 0,2$  мм, рекомендуемого номограммой, приведенной в документации машины при правке листа толщиной  $1,4$  мм, получаются следующие значения геометрических и деформационных параметров на входе: радиус кривизны  $R_{крив} = 40,8$  мм; кривизна  $\rho = 0,024$  мм<sup>-1</sup>; относительная продольная деформация на поверхности листа  $\varepsilon_{нар} = 1,72$  % и истинная (логарифмическая) деформация удлинения на поверхности листа  $e_{нар} = 0,0178$ .

Приведенные результаты вместе с ранее полученными расчетными значениями аналогичных показателей, содержащимися в таблице 2, как показал их регрессионный анализ, линейно зависят от величины параметра  $G$ . Например, для кривизны нейтральной (срединной) линии листа получена зависимость  $\rho = 0,0276 - 0,0195 \cdot G$  с коэффициентом корреляции  $r = -0,99993$ , а для относительной продольной деформации на поверхности листа – зависимость  $\varepsilon_{нар} = 1,9357 - 1,3564 \cdot G$  при  $r = -0,999713$ .

Полученные результаты хорошо согласуются с данными, приведенными в работе [6], что свидетельствует о возможности применения предлагаемой методики, основанной на модели точечного контакта листа с роликами, для расчета геометрических и деформационных параметров процесса правки листа при использовании этого процесса в качестве инструмента осуществления контролируемой знакопеременной деформации металлических материалов с целью управления их механическими и функциональными свойствами. При этом можно будет реализовать рекомендуемый в работе [8] учет особенностей формоизменения и упрочнения металла при обработке давлением со знакопеременной деформацией.

Таблица 2

Геометрические и деформационные характеристики при прохождении листом входных роликов правильной машины ARKU25/21

Варианты положения двух пар роликов на входе в правильную машину	Геометрические и деформационные характеристики при толщине полосы $H = 1,4$ мм							
	Варианты для случая точечного касания	Величина перекрытия (-) или зазора (+). мм	Расстояние между осями роликов, мм	$\epsilon_{нар}$ , %	$\epsilon_{нар}$	$R_{крив}$ , мм	$\rho$ , мм <sup>-1</sup>	
Полное касание роликов друг друга	-	- 4,29	20,71	-	-	-	-	
Полное касание деформируемой полосой роликов	-	- 2,61	22,39	5,3	0,052	13,2	0,076	
Частичное касание деформируемой полосой роликов	-	от - 1,78 до 1,4	от 23,22 до 26,4	5,3	0,052	13,2	0,076	
Точечное касание роликов деформируемой полосой	1	- 1,78	23,22	4,32	0,042	16,2	0,062	
	2	0	25,0	2,0	0,02	35,2	0,028	
	3	0,7 (0,5H)	25,7	1,0	0,01	70,1	0,014	
	4	1,05 (0,75H)	26,05	0,5	0,005	140,0	0,0071	
	5	1,4 (H)	26,4	0	0	$\infty$	0	

Такой (подобный) учёт должен базироваться на объективной информации о состоянии металлических материалов и о связи напряжений с деформациями, источником которой могут служить результаты механических испытаний, в частности наиболее распространённых и входящих в стандартно-приёмные процедуры испытаний на растяжение плоских и цилиндрических образцов [9].

Для прогнозирования напряжения, необходимого для начала пластической деформации, используются *кривые течения*, описывающие зависимость *истинного напряжения* от величины *деформации* [10]. Исходной информацией для построения кривой течения служит *индикаторная диаграмма*, которая схематически представлена на рис. 6 (для случая отсутствия площадки текучести). В современных испытательных машинах

индикаторная диаграмма выдается в численном представлении; например, испытательная машина Instron 3382, используемая в настоящей работе, выдает в течение полной длительности испытания с шагом 0,1 с в виде таблицы следующую информацию: условное напряжение (МПа), деформацию (%), осевую растягивающую нагрузку  $P$  (кгс), удлинение  $\Delta l$  (мм). Собственно две последние переменные ( $P$  и  $\Delta l$ ) являются осями координат индикаторной диаграммы.

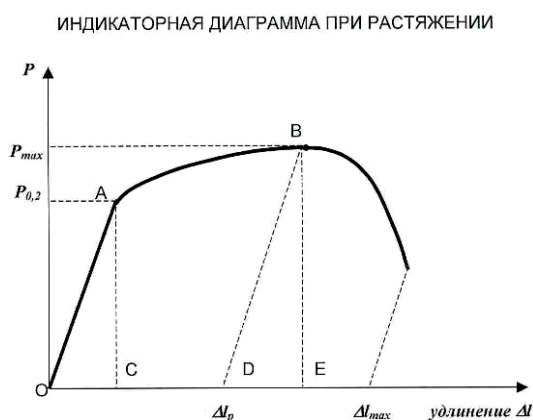


Рис.6. Схематическое представление *индикаторной диаграммы* при испытании на растяжение.

Для построения *кривой течения* используется участок  $AB$  индикаторной диаграммы, соответствующий равномерной пластической деформации при условии постоянства схемы одноосного напряженного состояния. Здесь точка  $A$  обозначает достижение относительной пластической деформацией величины 0,2 %, а нагрузка  $P_{0,2}$  при этом служит для определения условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$ . Точкой  $B$  отмечен момент образования шейки на образце, когда схема напряженного состояния из одноосной переходит в трехосную. Нагрузка  $P_{max}$  служит для определения временного сопротивления разрыву  $\sigma_B$ . Отмеченные характеристики получают из соотношений [11]:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}; \sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0},$$

где  $F_0$  – исходная площадь поперечного сечения образца, мм ( $F_0 = \text{const}$ , поэтому напряжения  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_B$  называются условными).

Определение *истинных напряжений*, как частных от деления текущей нагрузки  $P$  на текущую площадь  $F$  поперечного сечения образца на участке  $AB$  равномерной пластической деформации, основывается на законе

постоянства объема:  $F_0 \cdot l_0 = F \cdot l$ , откуда  $F = F_0 \cdot l_0 / l$ , а для расчета **истинного напряжения**  $\sigma$ , МПа, получаем соотношение:

$$\sigma = 9,81(P \cdot l / F_0 \cdot l_0), \quad (8)$$

где  $l_0$  и  $l$  – начальная и текущая рабочая длина образца, соответственно, мм.

Сложнее обстоит дело с выбором меры для переменной «деформация», являющейся аргументом **кривой течения**. Обычно принимаются следующие характеристики: степень относительной деформации при прокатке или осадке, вытяжка (в том числе логарифмическая) при прессовании через очко или волочении и другие подобные величины, которые по определению являются одномерными показателями деформации. В действительности схемы деформации многомерны; это либо объемная трехосная схема или плоская двухмерная схема. Кроме того, если брать в качестве мер линейные  $\varepsilon$  и угловые  $\gamma$  составляющие тензора деформаций, то они теряют смысл в качестве мер больших (конечных) пластических деформаций, так как соотношения для  $\varepsilon$  и  $\gamma$  получены в предположении, что перемещения и деформации малы, и их применение для оценки больших деформаций приводит к нарушению закона постоянства объема [12].

Кстати, упомянутые выше характеристики деформации являются аргументами **кривых упрочнения** [13], которые описывают зависимость условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  от величины деформации при конкретной операции обработки металлов давлением и для построения которых нужно производить некоторое количество испытаний, в то время как **кривая течения** определяется по индикаторной диаграмме в результате одного испытания.

Руководствуясь соображениями выбора универсальной меры деформации, предлагается в качестве её принять **интенсивность главных истинных деформаций** (или интенсивность истинных деформаций в направлении главных осей):

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2}, \quad (9)$$

где  $e_1, e_2, e_3$  – **главные истинные деформации** (или истинные деформации в направлении главных осей) [11]. В свою очередь, главные истинные деформации выражаются через изменения длин материальных волокон в направлении главных осей:

$$e_1 = \ln \frac{l_1}{l_1^0}; e_2 = \frac{l_2}{l_2^0}; e_3 = \frac{l_3}{l_3^0},$$

где  $l_i^0$  и  $l_i$  - начальная и текущая длина материального волокна вдоль  $i$ -ой главной оси, соответственно. Обозначаются главные истинные деформации таким образом, чтобы выполнялись условия  $e_1 \geq e_2 \geq e_3$ .

Форма  $e_i$ , задаваемая соотношением (9), гарантирует инвариантность предлагаемой меры деформации. Практически  $e_i$  определяется в пределах участка равномерной пластической деформации на индикаторной диаграмме при испытании на растяжение. Именно это обеспечивает условия простого нагружения и монотонной статической деформации в совокупности с постоянством схемы напряженно-деформированного состояния. При выполнении последовательности различных операций обработки металлов давлением используется свойство аддитивности  $e_i$ .

Так как компоненты для определения  $e_i$  берутся в системе главных осей деформации (при отсутствии угловых деформаций), то любые выделяемые в теле объемы не будут изменять форму до и после деформации. Это относится, в том числе, к прямоугольным параллелепипедам, чем можно воспользоваться при построении **кривых течения** по результатам испытаний на растяжение плоских образцов.

Обозначим в соответствии с [11] начальную толщину образца через  $a_0$ , начальную ширину образца в рабочей части  $b_0$  и начальную рабочую длину образца  $l_0$ , а текущие значения этих же величин на участке **AB индикаторной диаграммы** обозначим через  $a$ ,  $b$ ,  $l$ . Экспериментально показано, что на стадии равномерной деформации при растяжении выполняется условие равенства отношений  $a/a_0 = b/b_0$ , т.е. форма поперечного сечения образца изменяется подобно. При этом  $e_1 = \ln(l/l_0) > 0$ ;  $e_2 = \ln(a/a_0) < 0$ ;  $e_3 = \ln(b/b_0) < 0$ ; из закона постоянства объема  $e_1 + e_2 + e_3 = 0$  получается, что  $e_2 = e_3 = -0,5e_1$ . Подставляя  $e_1$ ,  $e_2$  и  $e_3$  в (9), получаем  $e_i = e_1 = \ln(l/l_0)$ . Если учесть, что  $l = l_0 + \Delta l$ , то для определения **интенсивности главных истинных деформаций**  $e_i$  нетрудно получить такое соотношение:

$$e_i = \ln(1 + \Delta l/l_0). \quad (10)$$

Тем самым можно считать вполне определенными значения аргумента **кривых течения**.

Аналитическое представление **кривых течения** может быть различным. Например, предложены следующие аппроксимации: Кербером  $\sigma_i = A + B\varepsilon_i$ ; Х.Свифтом  $\sigma_i = C(\varepsilon_0 + \varepsilon_i)^{n_1}$ ; А.Надаи  $\sigma_i = C_1\varepsilon_i^n$ ; П.Людвиком  $\sigma_i = \sigma_T + C_2\varepsilon_i^m$  и др. [9]. В приведенных уравнениях  $\sigma_i$ ;  $\varepsilon_i$  - интенсивность

напряжений и деформаций;  $\sigma_T$  – предел текучести;  $A$ ;  $B$ ;  $C$ ;  $C_1$ ;  $C_2$ ;  $\varepsilon_0$ ;  $n$ ;  $n1$ ;  $m$  – константы, определяемые по результатам механических испытаний.

На практике в качестве регрессионных моделей **кривых течения** преимущественно используются модели, предложенные А.Надаи и П.Людвиком, которые проверялись в ходе пробного эксперимента по оценке возможности изменения механических свойств металлических листов при их обработке на роликотправильной машине. В качестве модельного материала была выбрана технически чистая медь, полосы из которой толщиной 3 мм и шириной 20 мм проходили обработку на роликотправильной машине EcoMaster 2550 [1]. Предварительно полосы подвергались смягчающей термической обработке по режиму: нагрев до температуры 700 °С, выдержка 10 мин, охлаждение в воде. В исходном состоянии были оставлены две полосы (№№ 1 и 2), а третья (№ 3) прошла 20 пропусков в роликотправильной машине при следующих величинах зазоров: на входе – 2,25 мм, на выходе – 3,00 мм. Из полос вырезались стандартные плоские образцы, которые испытывались на разрыв на испытательной машине Instron 3382 в соответствии со стандартом [11]. Исходные размеры рабочей части образцов и результаты их испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3

Исходные размеры рабочей части разрывных образцов и их механические свойства при испытании на растяжение

№№ образцов	Исходные размеры рабочей части разрывных образцов, мм			Механические свойства		
	$l_0$	$a_0$	$b_0$	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
1	79,00	2,93	10,18	53	217	56,95
2	80,00	2,89	10,19	34	209	54,93
3	79,60	2,81	10,20	183	232	38,64

Полученные результаты в первую очередь свидетельствуют, что знакопеременная изгибная деформация медной полосы при её обработке в роликотправильной машины существенно повышает условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и снижает относительное удлинение после разрыва  $\delta$ . Наряду с этим следует подчеркнуть, что значения временного сопротивления разрыву  $\sigma_b$  исходного и обработанного металла можно считать относительно близкими величинами. Это объясняется тем, что при испытании на растяжение металлов с большим ресурсом пластичности, каковой является мягкая медь, непосредственно в процессе растяжения происходит наклеп и перед

разрывом условные напряжения разрушения достигают предельных сравнительно близких значений.

Построение и анализ *кривых течения* начнем с модели А.Надаи, включая в неё те переменные, которые подробно обоснованы и описаны выше:

$$\sigma = Ae_i^n, \tag{11}$$

где  $\sigma$  – истинное напряжение;  $e_i$  – интенсивность главных истинных деформаций.  $A$  и  $n$  – постоянные величины, определение которых возможно методом наименьших квадратов, для чего необходима замена переменных путем линеаризации зависимости (11). Эта задача решается логарифмированием обеих частей (11) и приведением её к виду:

$$\ln \sigma = \ln A + n \ln e_i. \tag{12}$$

Для построения *кривой течения* в координатах соотношения (12), а именно: аргумент  $X = \ln e_i$  и функция  $Y_l = \ln \sigma$ , исходной информацией является распечатка индикаторной диаграммы, из которой делается выборка значений удлинения  $\Delta l$  и соответствующей нагрузки  $P$ , начиная с точки  $C$  (рис. 6). Шаг по  $\Delta l$  переменный – при малых пластически деформациях (начальный участок кривой  $AB$  на индикаторной диаграмме) он равен 0,1 мм, а при больших пластических деформациях достигает 5,0 мм, как это представлено в таблице 4 для образца № 1.

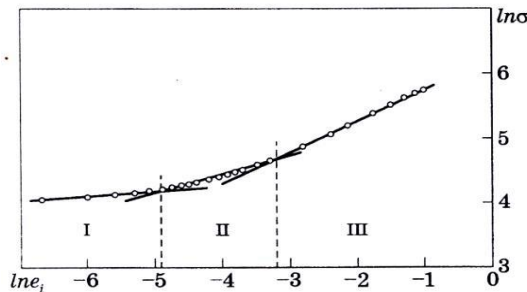


Рис.7. Представление *кривой течения* образца № 1 в форме модели А.Надаи с координатами  $\ln e_i - \ln \sigma$

Приведенные в таблице 4 значения переменных показаны в виде точек на рис. 7. Нетрудно видеть, что совокупность этих точек не может быть объединена в единую прямую, а, как минимум, представляет собой совокупность трех отрезков, т.е. является кусочно линейной функцией. Для каждого из трех областей определения аргумента  $e_i$  методом наименьших квадратов установлены коэффициенты аппроксимации, описывающие



искомую функцию  $\sigma$ . Аналогично строились модели А.Надаи **кривых течения** образцов №№ 2 и 3. Соответствующие результаты для всех трех образцов представлены в таблице 5. В этой таблице приводятся значения коэффициента линейной корреляции  $r$ , величина которого подтверждает обоснованность линейной связи между переменными.

Таблица 4

 Исходная информация для построения *кривой течения* образца № 1

$\Delta l$ , мм	$P$ , кгс	$e_i$	$\sigma$ , МПа	$X = \ln e_i$	$Y_1 = \ln \sigma$	$Y_2 = \ln(\sigma - \sigma_{0,2})$
0,101	172,48	0,00128	56,76	- 6,663	4,039	1.324
0,200	179,08	0,0025	59,00	- 5,980	4,078	1.792
0,300	185,23	0,0038	61,11	- 5,575	4,113	2.093
0,401	191,34	0,0050	63,20	- 5,286	4,146	2.322
0,500	197,26	0,0063	65,24	- 5,066	4,178	2.505
0,601	202,93	0,0076	67,20	- 4,882	4,208	2.653
0,700	208,29	0,0088	69,06	- 4,731	4,234	2.776
0,801	213,58	0,0101	70,90	- 4,596	4,261	2.885
0,900	218,86	0,0113	72,75	- 4,480	4,287	2.983
1,000	223,85	0,0126	74,49	- 4,376	4,311	3.068
1,2003	233,60	0,0151	77,94	- 4,194	4,356	3.216
2,4004	243,03	0,0176	81,29	- 4,041	4,398	3.343
1,6005	252,13	0,0201	84,54	- 3,909	4,437	3.451
1,8007	260,77	0,0225	87,65	- 3,793	4,473	3.545
2,001	269,01	0,0250	90,65	- 3,688	4,507	3.628
2,500	289,08	0,0311	98,01	- 3,469	4,585	3.807
3,001	307,73	0,0373	104,97	- 3,289	4,654	3.951
5,000	371,75	0,0614	129,90	- 2,791	4,867	4.343
7,701	439,65	0,0930	158,57	- 2,375	5,066	4.659
10,000	484,89	0,1192	179,63	- 2,127	5,190	4.800
15,000	556,81	0,1738	217,73	- 1,750	5,383	5.104
20,000	603,07	0,2257	248,37	- 1,489	5,515	5.275
25,000	631,77	0,2749	273,33	- 1,291	5,616	5.395
30,000	648,06	0,3219	293,86	- 1,134	5,683	5.484
35,001	658,73	0,3668	312,40	- 1,003	5,744	5.558

По такому же алгоритму строилась модель **кривой течения** П.Людвика, которая выражается зависимостью

$$\sigma = \sigma_{0,2} + B e_i^n. \quad (13)$$

Линеаризация этой модели достигается её преобразованием к виду  $\sigma - \sigma_{0,2} = B e_i^n$  и логарифмированием, т.е. представлением её в координатах:  $X = \ln e_i$  и  $Y_2 = \ln(\sigma - \sigma_{0,2})$ . Как и выше, точки с координатами  $X - Y_2$  образца № 1 (см. таблицу 4) представлены на рис. 8, из которого следует, что они укладываются на прямую линию. Подобные картины были получены для

образцов №№ 2 и 3, результаты регрессионно-корреляционного анализа *кривых течения* всех образцов приведены в таблице 6.

Таблица 5

Результаты аппроксимации *кривых течения* вида  $\sigma = Ae_i^n$  медных полос до и после деформации на роликоправильной машине

№№ образцов	Номер участка	Коэффициенты регрессии		Коэффициент линейной корреляции $r$	Область определения $e_i$	
		$A$ , МПа	$n$		от	до
1	I	99,25	0,0852	0,9822	0,00128	0,00761
	II	254,32	0,2781	0,9934	0,00761	0,00383
	III	516,93	0,4956	0,9999	0,00383	0,36680
2	I	86,14	0,1339	0,9822	0,00130	0,00726
	II	235,07	0,3404	0,9979	0,00726	0,02909
	III	542,72	0,5809	0,9993	0,02909	0,40550
3	I	213,77	0,0198	0,9870	0,00126	0,01742
	II	276,97	0,0815	0,9856	0,01742	0,05857
	III	414,76	0,2406	0,9995	0,05857	0,27490

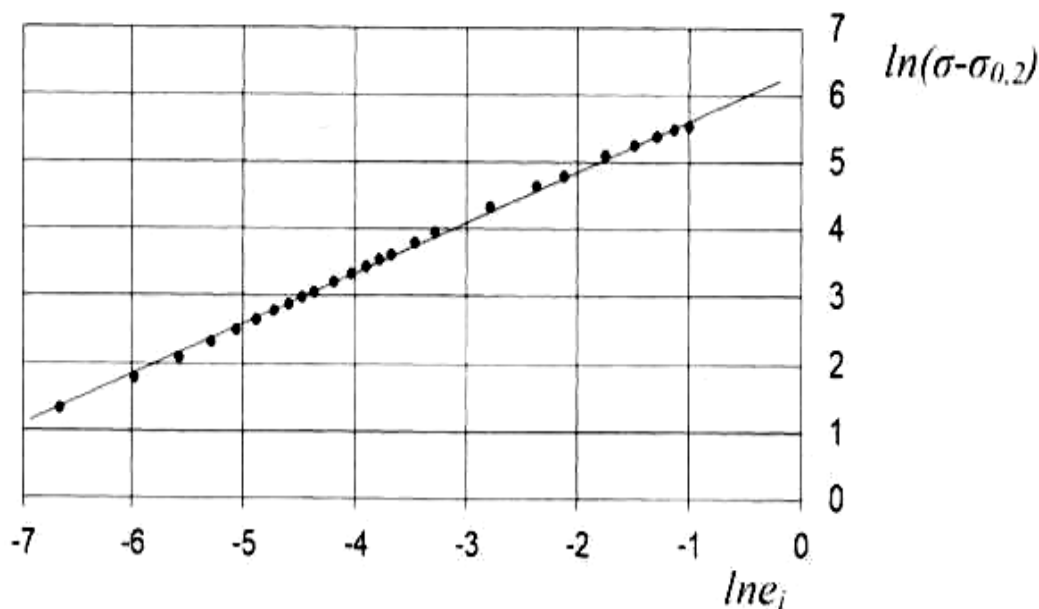


Рис.8. Представление *кривой течения* образца № 1 в форме модели П.Людвика с координатами  $\ln e_i - \ln (\sigma - \sigma_{0,2})$ .

Таблица 6

Результаты аппроксимации *кривых течения* вида  $\sigma = \sigma_{0,2} + B e_i^n$  медных полос до и после деформации на роликоправильной машине

№№ образцов	Коэффициенты регрессии			Коэффициент линейной корреляции $r$	Область определения $e_i$	
	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$B$ , МПа	$n$		от	до
1	53	614,62	0,7672	0,9994	0,00128	0,3668
2	34	713,37	0,8461	0,9977	0,0013	0,4055
3	183	227,81	0,6189	0,9922	0,00126	0,2749

Модель *кривой течения* П.Людвика имеет ряд преимуществ по сравнению с моделью А.Надаи. Это, прежде всего, структура модели с учетом ее трактовки на основе физической картины деформации при линейной схеме напряженного состояния. Обратимся к *индикаторной диаграмме* (рис. 6). После упругой деформации на участке  $OA$  по достижению относительной деформацией удлинения условной величины 0,2 %, т.е. в точке  $A$ , начинается равномерная пластическая деформация с нелинейным повышением растягивающего истинного напряжения  $\sigma$ . Именно поэтому условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  играет роль своеобразной границы между упругой и пластической деформацией и входит в правую часть соотношения (13) в виде постоянного слагаемого. А второе слагаемое, характеризующее процесс нелинейного холодного наклепа, представляет собой модель А.Надаи.

В этом месте следует подчеркнуть, что модель А.Надаи в форме *кривой упрочнения* вида  $\sigma_i = C \varepsilon_i^n$  широко используется для оценки штампуемости листовых материалов, причем показатель деформационного упрочнения  $n$  наряду с коэффициентом нормальной анизотропии  $R$  используются в качестве критериальных характеристик технологической пластичности при листовой штамповке [13]. Методика их определения при испытаниях на растяжение включена в соответствующий стандарт [11] в виде рекомендуемого приложения, а конкретные значения  $n$  и  $R$  уже стали частью нормативно-технической документации.

Выбор *интенсивности главных истинных деформаций* в качестве аргумента *кривой течения* позволяет использовать уравнение последней для прогнозирования величины холодного наклепа при обработке давлением металлических материалов по различным схемам напряженно-деформированного состояния. Кстати, на основании полученных уравнений *кривых течения* исходных медных полос можно решить обратную задачу – определить величину интенсивности главных истинных деформаций,

обеспечивающую величину условного предела текучести, достигнутого после обработки на роликотправильной машине. Уравнение *кривой течения* образца № 1  $\sigma = 53 + 614,62 e_i^{0,7672}$ , а условный предел текучести образца № 3 равен 183 МПа. Подставляя это значение в левую часть уравнения *кривой течения*, получаем  $e_i = 0,13$ . Из уравнения  $\sigma = 34 + 713,37 e_i^{0,84612}$  *кривой течения* образца № 2 получаем  $e_i = 0,16$ . Среднее значение будет равно  $e_i = 0,145$ .

Этот простой пример показывает, что уравнение *кривой течения* является единственным и неповторимым, так как получается в итоге обработки результатов испытания на растяжение одного образца. При наличии двух или более испытаний исходного материала для прогноза рекомендуется выбирать средний результат соответствующих расчетов  $e_i$ . Следует еще заметить, что аргумент *кривой течения*  $e_i < 1$ , поэтому при одном и том же значении  $e_i$  прогнозируемая величина истинного напряжения  $\sigma$  начала пластической деформации будет тем больше, чем меньше показатель деформационного упрочнения  $n$ .

Ниже предлагается модель определения геометрических и деформационных характеристик при знакопеременном упруго-пластическом изгибе с убывающей кривизной, характерном для процесса правки на роликовых машинах.

В операции правки листов на таких машинах полоса подвергается знакопеременному изгибу, при котором относительные деформации удлинения (для наружного волокна) и укорочения (для внутреннего волокна) определяются из соотношений (14):

$$\varepsilon_{нар} = \frac{H}{2R_{крив}} 100\%; \quad \varepsilon_{вн} = -\frac{H}{2R_{крив}} 100\% , \quad (14)$$

где  $H$  – толщина полосы;  $R_{крив}$  – радиус кривизны нейтральной плоскости, проходящей через середину толщины полосы. Для наружного и внутреннего волокон интенсивности главных истинных деформаций удлинения и укорочения составляют:

$$e_i^{нар} = \ln \frac{R_{крив} + 0,5H}{R_{крив}}; \quad e_i^{вн} = \ln \frac{R_{крив} - 0,5H}{R_{крив}} . \quad (15)$$

В случае изгиба, когда контакт листа с роликами происходит в точке, радиус кривизны нейтральной плоскости полосы определится из соотношения:

$$R_{крив} = \frac{\sqrt{(0,5L)^2 + (H - G)^2}}{4 \cos \left[ \arctg \frac{L}{2(H - G)} \right]} , \quad (16)$$

где  $L$  – расстояние между осями роликов;  $G$  – расстояние между плоскостями, касательными к образующим верхнего и нижнего рядов роликов, в местах осуществления изгиба (при  $G < 0$  – перекрытие; при  $G \geq 0$  – зазор).

Эпюра распределения абсолютных деформаций  $\Delta l$  по толщине полосы (рис.9) представляет собой прямую  $de$ , проходящую через точку  $O$ , которая находится на нейтральной линии при изгибе полосы. Основанием эпюры является отрезок  $cf$ , представляющий собой часть оси абсцисс, а осью ординат служит касательная к нейтральной линии в точке  $O$ . Существенным является тот факт, что деформации при изгибе могут быть упругими или пластическими в зависимости от напряжений, величина которых определяется приложенными изгибающими моментами  $M_{изг}$  или, другими словами, радиусом кривизны нейтральной линии. В качестве условной границы между упругими и пластическими деформациями целесообразно выбрать относительную деформацию  $\epsilon_{0,2}$  (длина отрезка  $ab$  на рис. 9), которая в соответствии с действующими стандартами характеризует условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  при испытании на растяжение [15]. Из подобия треугольников

$Oab$  и  $Ocd$  следует, что  $\frac{Oa}{Oc} = \frac{ab}{cd}$ , откуда  $Oa = \frac{ab \times Oc}{cd}$ . Так как толщина

упруго-деформируемого слоя  $\Delta = 2Oa$ , а  $H = 2Oc$ , то в результате получаем следующее соотношение для определения  $\Delta$ . Таким образом, получается, что только на участках  $ac$  и  $gf$  сечения полосы происходит наклеп металла за счет пластической деформации

$$\Delta = \frac{0,2 H}{\epsilon_{нар}} \tag{17}$$

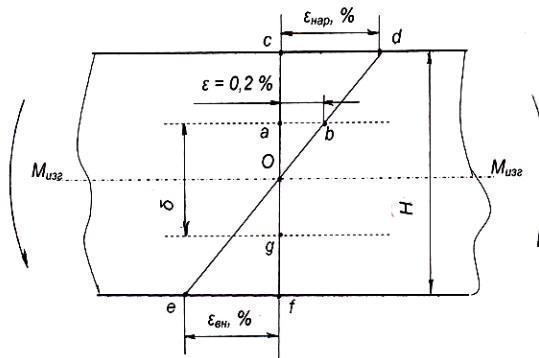


Рис.9. Схема к определению толщины упруго деформируемого слоя при изгибе полосы

При малом значении аргумента  $x$  для определения величины логарифмической функции справедливо приближенное соотношение  $\ln(1+x) \approx x$ . В случае оценки значения интенсивности главных истинных деформаций при линейном напряженном состоянии (схемы изгиба и растяжения), когда  $e_i = \ln(l/l_0)$ , где  $l$  и  $l_0$  – текущая и начальная длины выделенного волокна или отрезка, соответственно; это соотношение приводится к виду  $e_i = \ln(l/l_0) = \ln(1+x)$ . Тогда  $1+x = l/l_0$ , откуда  $x = l/l_0 - 1 = (l - l_0)/l_0 = \Delta l/l_0$ , и в результате получаем

$$e_i = \ln(1 + \Delta l/l_0) = \Delta l/l_0, \quad (18)$$

где  $\Delta l$  - абсолютное удлинение выделенного волокна или отрезка.

Соотношение (18) свидетельствует о том, что распределение интенсивности главных истинных деформаций  $e_i$  по толщине  $ac$  пластически деформируемого слоя повторяет распределение  $\Delta l$ , т.е. по прямой линии  $bd$ . Таким образом, среднее значение интенсивности главных истинных деформаций будет равно  $e_i^{cp} = 0,5(e_i^{нар} + e_i^{0,2})$ , где  $e_i^{нар}$  и  $e_i^{0,2}$  - интенсивности главных истинных деформаций в наружном волокне и на границе с упруго деформируемым центральным слоем полосы, соответственно. Величина  $e_i^{0,2}$  задается линейной деформацией 0,2 %, соответствующей условному пределу текучести  $\sigma_{0,2}$ . Если этой деформацией пренебречь в силу её малости, то тогда среднее значение интенсивности главных истинных деформаций можно оценивать по соотношению

$$e_i^{cp} = 0,5e_i^{нар}. \quad (19)$$

Аналогичные выкладки справедливы для анализа деформации нижней половины полосы (см. схему), волокна которой испытывают укорочение при изгибе. Как показано в работе [16], воздействие этой деформации на свойства полосы идентично эффекту упрочнения при удлинении. Следовательно, накопленная интенсивность главных истинных деформаций в сечении полосы при её прохождении через роликотправильную машину составит

Таблица 7

Расчет деформаций при знакопеременном изгибе в машине EcoMaster2550 при  $G_1 = 2,25$  мм и  $G_{19} = 3,0$  мм (толщина полосы 3,0 мм)

№№ изгиба	G, мм	R <sub>крив</sub> , мм	$\gamma$ , мм <sup>-1</sup>	$\epsilon_{нар}$ , %	$e_i^{нар}$	$e_i^{\Sigma}$	$\Delta$ , мм
1	2,25	64,921	0,0154	2,311	0,0223	0,0112	0,250
2	2,29	68,716	0,0146	2,136	0,0211	0,0217	0,281
3	2,33	73,000	0,0137	2,055	0,0199	0,0317	0,292

## ИМЕТ РАН

## 80 лет

4	2,38	79,625	0,0126	1,849	0,0183	0,0408	0,325
5	2,42	83,405	0,0120	1,767	0,0175	0,0500	0,340
6	2,46	89,808	0,0111	1,643	0,0163	0,0577	0,365
7	2,50	97,284	0,0103	1,518	0,0151	0,0653	0,395
8	2,54	106,118	0,0094	1,394	0,0138	0,0722	0,430
9	2,58	116,719	0,0086	1,269	0,0126	0,0785	0,473
10	2,63	129,675	0,0077	1,144	0,0114	0,0842	0,525
11	2,67	145,874	0,0069	1,018	0,0101	0,0892	0,589
12	2,71	166,702	0,0060	0,892	0,0089	0,0937	0,673
13	2,75	194,475	0,0051	0,765	0,0076	0,0975	0,784
14	2,79	233,360	0,0043	0,639	0,0064	0,1007	0,939
15	2,83	291,688	0,0034	0,512	0,0051	0,1032	1,173
16	2,88	388,903	0,0026	0,384	0,0038	0,1051	1,562
17	2,92	583,342	0,0017	0,256	0,0026	0,1064	2,339
18	2,96	1166,67	0,00086	0,128	0,0013	0,1071	4,673
19	3,0	$\infty$	0	0	0	-	-

$$e_i^\Sigma = \sum_{j=1}^k e_{ij}^{cp}, \quad (20)$$

где  $j$  – порядковый номер операции изгиба;  $k$  – номер последней операции изгиба перед тем, как выполнится неравенство  $\Delta \geq H$ , когда уже во всем сечении полосы пластическая деформация заменяется упругой. Это соотношение использовалось при исследовании воздействия знакопеременного упруго-пластического изгиба на формирование механических свойств медных полос.

Таблица 8

Расчет деформаций при знакопеременном изгибе в машине EcoMaster25 при  $G_1 = 2,75$  мм и  $G_{10} = 3,0$  мм (толщина полосы 3,00 мм)

№ изгиба	G, мм	R <sub>крив</sub> , мм	$\gamma$ , мм <sup>-1</sup>	$\epsilon_{нар}$ , %	$e_i^{нар}$	$e_i^{\Sigma}$	$\Delta$ , мм
1	2,75	194,48	0,0051	0,765	0,0076	0,0038	0,784
2	2,764	205,91	0,0049	0,723	0,0072	0,0074	0,830
3	2,778	218,78	0,0046	0,681	0,0068	0,0108	0,881
4	2,792	233,36	0,0043	0,639	0,0064	0,0140	0,939
5	2,806	250,02	0,0040	0,596	0,0059	0,0170	1,006
6	2,819	269,25	0,0037	0,554	0,0055	0,0197	1,083
7	2,833	291,69	0,0034	0,512	0,0051	0,0223	1,173
8	2,847	318,20	0,0031	0,469	0,0047	0,0246	1,279
9	2,861	350,02	0,0029	0,427	0,0043	0,0268	1,406
10	2,875	388,91	0,0026	0,384	0,0038	0,0287	1,562
11	2,889	437,51	0,0023	0,342	0,0034	0,0304	1,756
12	2,903	500,01	0,0020	0,299	0,0030	0,0319	2,006
13	2,917	583,35	0,0017	0,256	0,0026	0,0332	2,339
14	2,931	700,01	0,0014	0,214	0,0021	0,0342	2,806
15	2,944	875,01	0,0011	0,171	0,0017	0,0351	3,506
16	2,958	1166,7	0,0009	0,128	0,0013	0,0357	4,673
17	2,972	1750,0	0,0006	0,0856	0,0009	0,0362	7,01
18	2,986	$\infty$	0	0	0	-	-

Полосы из технической чистой меди номинальных размеров (толщина  $H = 3,0$  мм; ширина  $B = 20,0$  мм) обрабатывались на прецизионной роликотправильной машине EcoMaster2550 [17] с рабочими роликами диаметром  $D = 25$  мм при расстоянии между их центрами  $L = 28$  мм. В соответствии с номограммой установки машины EcoMaster2550 для номинальной толщины полосы 3,0 мм интервал зазора на входе ( $G_1$ ) изменяется в пределах от 2,25 до 2,75 мм. Именно эти предельные размеры зазора  $G_1$  были выбраны при проведении экспериментов. Для номинальной толщины ( $H = 3,0$  мм) при установках входного зазора 2,25 и 2,75 мм с помощью вышеприведенных соотношений были рассчитаны относительные деформации и интенсивности главных истинных деформаций, представленные в таблицах 7 и 8.

Общими в этих таблицах являются рост радиуса кривизны средней линии полосы  $R_{крив}$ , убывание характеристик деформации и кривизны  $\gamma = R_{крив}^{-1}$  по мере движения полосы от входа к выходу роликотправильной машины. Одновременно наблюдается рост толщины упруго деформируемого слоя  $\Delta$ , когда при условии  $\Delta \geq H$  прекращается пластическая деформация в



сечении полосы. Для  $G_1 = 2,25$  мм последняя операция изгиба в этом смысле имеет номер 17, а для  $G_1 = 2,75$  мм – 14.

Всего было проведено четыре серии экспериментов. В первой серии решалась основная задача: выяснение возможностей изменения свойств медных полос при обработке на роликоправильной машине с установкой зазора на входе  $G_1 = 2,25$  мм, которая обеспечивает максимальную относительную деформацию 2,3 % в наружных волокнах полос (первая строка в таблице 7). Деформация полос после смягчающей обработки (нагрев при температуре  $700^{\circ}\text{C}$ , выдержка 10 мин, охлаждение в воде) по следующей схеме: первая полоса пропусклась через роликоправильную машину 5 раз, вторая – 10 раз, третья – 15 раз и четвертая – 20 раз. Из полос вырезались стандартные плоские образцы, которые испытывались на растяжение на испытательной машине Instron 3382 в соответствии со стандартом [15]. В результате было установлено, что уже после 5-и проходов у полос значительно повышался условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и заметно снижалось относительное удлинение  $\delta$ ; дальнейшее увеличение числа проходов не приводило к существенному изменению механических свойств [9].

Таблица 9

Расчет деформаций при знакопеременном изгибе в роликоправильной машине EcoMaster2550 при  $G_1 = 2,25$  мм и  $G_{19} = 3,0$  мм (толщина полосы 2,87 мм)

№№ изгиба	$G$ , мм	$R_{\text{крив}}$ , мм	$\gamma$ , мм <sup>-1</sup>	$\varepsilon_{\text{нар}}$ , %	$e_i^{\text{нар}}$	$e_i^{\Sigma}$	$\Delta$ , мм
1	2,25	80,024	0,0125	1,762	0,0175	0,0088	0,326
2	2,29	83,844	0,0119	1,683	0,0167	0,0171	0,341
3	2,33	90,398	0,0111	1,563	0,0155	0,0249	0,367
4	2,38	100,06	0,0100	1,414	0,0140	0,0319	0,406
5	2,42	109,38	0,0091	1,295	0,0129	0,0388	0,443
6	2,46	120,69	0,0083	1,175	0,0117	0,0442	0,489
7	2,50	129,63	0,0077	1,095	0,0109	0,0496	0,524
8	2,54	145,83	0,0069	0,974	0,0097	0,0545	0,589
9	2,58	166,67	0,0060	0,854	0,0085	0,0586	0,672
10	2,63	205,88	0,0049	0,692	0,0069	0,0622	0,829
11	2,67	250,00	0,0040	0,571	0,0057	0,0650	1,005
12	2,71	291,67	0,0034	0,490	0,0049	0,0675	1,172
13	2,75	388,89	0,0026	0,368	0,0037	0,0693	1,561
14	2,79	583,33	0,0017	0,245	0,0025	0,0706	2,339
15	2,83	1166,67	0,0009	0,123	0,0010	0,0711	4,672
16	2,88	$\infty$	0	0	0	-	-

С учетом результатов первой серии экспериментов последующие серии предусматривали следующие схемы обработки полос: первая полоса

пропускалась через машину 1 раз, вторая – 2 раза, третья – 3 раза, четвертая – 4 раза, пятая – 5 раз. Различия были только в установке входящего зазора  $G_1$ : для серий 2 и 3 это было  $G_1 = 2,25$  мм (минимальное значение при толщине полосы  $H = 3,0$  мм), а для серии 4  $G_1 = 2,75$  мм (максимальное значение при  $H = 3,0$ ). Полосы серии 2 отличались от полос серий 3 и 4 режимом смягчающей обработки: обработка полос серии 2 была такой же, как у серии 1, а полосы серий 3 и 4 выдерживали при температуре  $700$  °С 30 мин и охлаждали в воде. Продольные скорости перемещения полос всех серий в роликотправильной машине EcoMaster2550 составляли 3 м/мин.

В процессе проведения исследований выяснилось, что реальная толщина медных полос отличается от номинальной и в среднем составляет  $H = 2,87$  мм. Для объективной оценки относительных деформаций  $\varepsilon_{нар}$  и интенсивностей главных истинных деформаций  $e_i$  были выполнены соответствующие расчеты для указанной выше средней толщины полос при двух значениях  $G_1$  2,25мм и 2,75мм. Полученные результаты приведены в таблицах 9 и 10.

Таблица 10

Расчет деформаций при знакопеременном изгибе в машине EcoMaster2550 при  $G_1 = 2,75$  мм и  $G_{19} = 3,00$  мм (толщина полосы 2,87 мм)

№ изгиба	$G$ , мм	$R_{крив}$ , мм	$\gamma$ , мм <sup>-1</sup>	$\varepsilon_{нар}$ , %	$e_i^{нар}$	$e_i^{\Sigma}$	$\Delta$ , мм
1	2,75	397,74	0,0025	0,360	0,0036	0,0018	1,594
2	2,764	448,73	0,0022	0,319	0,0032	0,0034	1,800
3	2,778	500,01	0,0020	0,286	0,0029	0,0049	2,006
4	2,792	583,34	0,0017	0,245	0,0025	0,0061	2,339
5	2,806	700,01	0,0014	0,206	0,0020	0,0071	2,806
6	2,819	921,05	0,0011	0,156	0,0016	0,0079	3,690
7	2,833	1166,7	0,0009	0,123	0,0012	0,0085	4,673
8	2,847	1944,4	0,0005	0,074	0,0007	0,0089	7,783
9	2,861	3500,0	0,0003	0,041	0,0004	0,0091	14,006
10	2,875	$\infty$	0	0	0	-	-

Данный факт не отрицает значения данных, представленных в таблицах 7 и 8, которые могут быть использованы при анализе общих вопросов формирования механических свойств медных полос после обработки на роликотправильной машине. Даже простое сопоставление таблиц (попарно) 7-й и 9-й, и 8-й и 10-й показывает, что значения частных деформаций  $\varepsilon_{нар}$ , интенсивность роста упруго-деформируемого слоя  $\Delta$  и динамика изменения накопленной интенсивности главных истинных

деформаций  $e_i^\Sigma$  в ряде случаев принципиально отличаются для разных толщин.

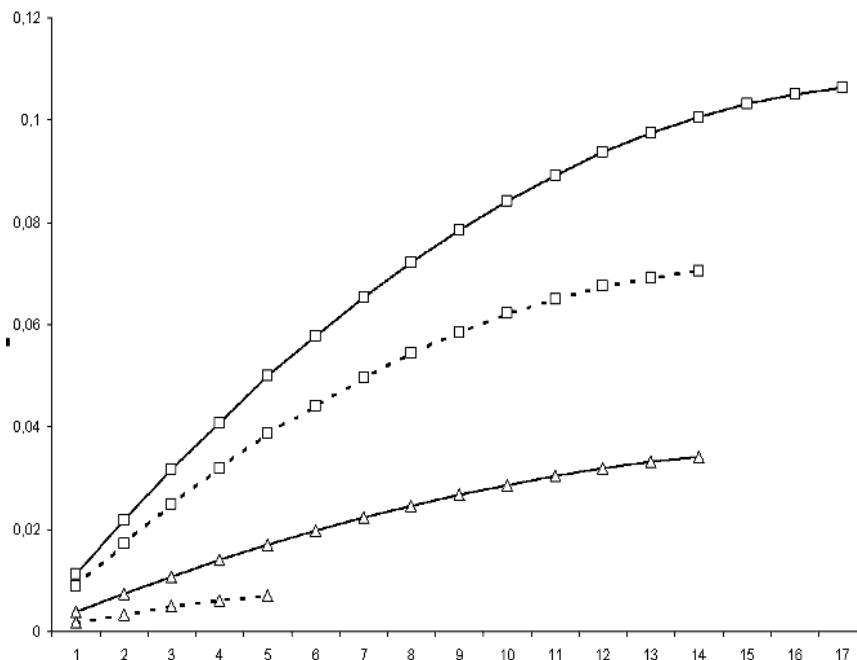


Рис.10. Изменение значения накопленной интенсивности главных истинных деформаций по мере продвижения медной полосы в роликоправильной машине EcoMaster2550 ( $G_1 = 2,25$  мм;  $G_1 = 2,75$  мм; сплошная линия – толщина полосы 3,0 мм; пунктирная линия – толщина полосы 2,87 мм)

Это наглядно можно продемонстрировать с помощью графиков изменения основных показателей, характеризующих величину пластической деформации, определяющей изменения механических свойств (накопленная интенсивность главных истинных деформаций  $e_i^\Sigma$ ), и ограничивающих область распространения пластической деформации по сечению полос ( $\Delta$ ), при их движении от входа в роликоправильную машину к выходу из неё (рис. 10 и рис. 11). Из приведенных графиков следует, что геометрические и деформационные условия процесса многократного упруго-пластического изгиба с убывающей кривизной в решающей степени зависят от величины разности между толщиной полосы ( $H$ ) и зазора между роликами со стороны входа в роликоправильную машину ( $G_1$ ).

Таблица 11

Механические свойства медных полос до и после обработки на роликоправильной машине EcoMaster2550

Номер серии экспериментов	№ образца	Кол-во проходов	Зазор на входе	Зазор на выходе	Механические свойства при растяжении			
					$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\delta_{равн.}$ , %
1-я серия	1-0	0	-	-	39	206	57,29	47,22
	1-1	5			179	224	38,37	27,25
	1-2	10	2,25	3,0	188	224	39,24	28,34
	1-3	15			179	224	36,18	23,26
	1-4	20			185	226	37,78	20,25
2-я серия	2-0	0	-	-	31	206	52,72	46,81
	2-1	1			150	218	44,58	28,68
	2-2	2			158	221	43,19	26,76
	2-3	3	2,25	3,0	171	223	40,92	24,88
	2-4	4			179	224	40,01	23,89
3-я серия	3-0	0	-	-	31	210	53,77	39,53
	3-1	1			133	218	42,56	30,18
	3-2	2			154	220	43,95	25,57
	3-3	3	2,25	3,0	164	221	42,38	26,26
	3-4	4			175	223	40,71	23,90
4-я серия	4-0	0	-	-	35	210	56,25	43,75
	4-1	1			43	212	55,36	43,17
	4-2	2			49	211	59,62	40,71
	4-3	3	2,75	3,0	52	212	57,69	41,11
	4-4	4			48	211	58,09	40,93
	4-5	5			45	211	55,98	42,71

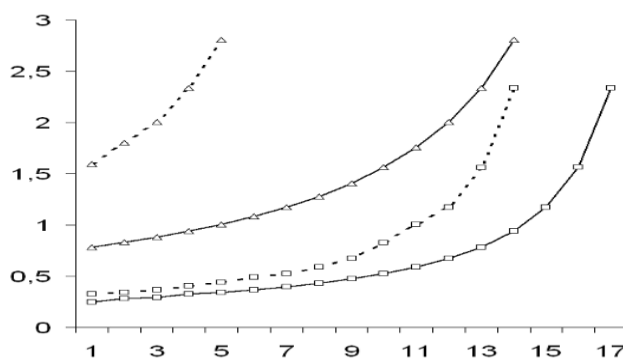


Рис.11. Изменение значения толщины упругодеформируемого слоя  $\Delta$  по мере продвижения медной полосы в роликоправильной машине EcoMaster2550 (  $\square$  -  $G_1 = 2,25$  мм;  $\square$  -  $G_1 = 2,75$  мм; сплошная линия – толщина полосы 3,0 мм; пунктирная линия – толщина полосы 2,87 мм)

Все полосы проходили испытания механических свойств на растяжение [15]. Результаты испытаний свойств до и после обработки на роликотправильной машине приведены в таблице 11. Из представленных данных можно отметить следующее: во-первых, кардинальное изменение всех механических свойств смягченных медных полос происходит после первого прохода; во-вторых, наиболее значительно повышается условный предел текучести; в-третьих, характер изменения свойств полос 4-й серии экспериментов существенно отличается от изменения свойств полос 2-й и 3-й серий экспериментов. Последнее объясняется тем, что реальные полосы отличаются по толщине от номинальных, причем, как следует из рис. 10 и 11, отклонение по толщине всего на 4,3 % особенно сильно сказывается при больших значениях величины зазора со стороны входа ( $G_1$ ). Это подтверждается и структурой соотношения (16), в котором радиус кривизны нейтрального сечения полосы  $R_{\text{крив}}$  является функцией разности  $H - G$  при постоянстве расстояния между осями роликов  $L$ .

По индикаторным диаграммам, полученным при испытаниях полос на растяжение, с использованием методики, описанной в [9], были определены уравнения кривых течения медных полос до и после обработки на роликотправильной машине, приведенные в таблице 12.

Уравнения кривых течения адекватно отражают экспериментальные данные, о чем свидетельствуют значения коэффициентов корреляции  $r$ , которые определялись в координатах  $\ln(\sigma - \sigma_{0,2}) - \ln(e_i)$  для линеаризованной формы кривой течения. В общем виде уравнения кривых течения можно описать следующим соотношением:

$$\sigma = \sigma_{0,2} + Ve_i^n. \quad (21)$$

Коэффициенты в правой части соотношения (21) существенно изменяются после первого прохода и в меньшей степени – после последующих проходов. Более того, в 4-й серии экспериментов коэффициент  $V$  и показатель степени  $n$  остаются после первого прохода практически неизменными.

При холодной пластической деформации медных полос в состоянии после смягчающей термообработки происходит их упрочнение, приводящее к увеличению условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  и временного сопротивления  $\sigma_6$ . Если обозначить через  $\sigma_{0,2}^{уп}$  условный предел текучести после упрочнения, то с помощью (21) можно определить интенсивность главных истинных деформаций  $e_i^{уп}$ , как меру пластической деформации, приводящей к упрочнению:

$$e_i^{ynp} = \exp\left(\frac{1}{n} \ln \frac{\sigma_{0,2}^{ynp} - \sigma_{0,2}}{B}\right). \quad (22)$$

*Таблица 12*

Уравнения кривых течения медных полос до и после обработки на роликотравильной машине EcoMaster2550

Номер серии экспериментов	Состояние полосы	Уравнение кривой течения	Коэффициент корреляции $r$
1-я серия	после термообработки	$\sigma = 39 + 704e_i^{0,8397}$	0,9994
	после 5-и проходов	$\sigma = 179 + 380e_i^{0,8661}$	0,9954
	после 10-и проходов	$\sigma = 180 + 249e_i^{0,6561}$	0,9956
	после 15-и проходов	$\sigma = 179 + 203e_i^{0,5801}$	0,9923
	после 20-и проходов	$\sigma = 185 + 206e_i^{0,5771}$	0,9956
2-я серия	после термообработки	$\sigma = 31 + 672e_i^{0,8382}$	0,9986
	после 1-го прохода	$\sigma = 150 + 307e_i^{0,7137}$	0,9967
	после 2-х проходов	$\sigma = 158 + 292e_i^{0,6995}$	0,9962
	после 3-х проходов	$\sigma = 171 + 202e_i^{0,551}$	0,9851
	после 4-х проходов	$\sigma = 179 + 228e_i^{0,6435}$	0,9942
3-я серия	после 5-и проходов	$\sigma = 175 + 242e_i^{0,6609}$	0,9944
	после термообработки	$\sigma = 31 + 719e_i^{0,8341}$	0,9993
	после 1-го прохода	$\sigma = 133 + 465e_i^{0,8388}$	0,9998
	после 2-х проходов	$\sigma = 154 + 328e_i^{0,7507}$	0,9973
	после 3-х проходов	$\sigma = 164 + 292e_i^{0,7277}$	0,9964
4-я серия	после 4-х проходов	$\sigma = 175 + 301e_i^{0,7779}$	0,9984
	после 5-и проходов	$\sigma = 176 + 270e_i^{0,7129}$	0,9971
	после термообработки	$\sigma = 35 + 717e_i^{0,8447}$	0,9988
	после 1-го прохода	$\sigma = 43 + 666e_i^{0,8116}$	0,9994
	после 2-х проходов	$\sigma = 49 + 666e_i^{0,827}$	0,9992
	после 3-х проходов	$\sigma = 52 + 655e_i^{0,8205}$	0,9994
	после 4-х проходов	$\sigma = 48 + 655e_i^{0,8139}$	0,9994
	после 5-и проходов	$\sigma = 45 + 658e_i^{0,8116}$	0,9994

Ниже приводятся значения  $e_i^\Sigma$ , взятые из таблиц 3 и 4, и вычисленные по соотношению (9) значения  $e_i^{ynp}$  для соответствующих серий экспериментов:

№ серий экспериментов	$e_i^\Sigma$	$e_i^{ynp}$
2	0,0706	0,1268
3	0,0706	0,0962
4	0,0071	0,0049

Наблюдаемое в приведенных данных несовпадение значений  $\epsilon_i^{\Sigma}$  и  $\epsilon_i^{\text{упр}}$  можно объяснить использованием в расчетах средней величины толщины медных полос ( $H = 2,87$  мм), хотя в действительности толщина полос колебалась в пределах от 2,81 до 2,95 мм, так как полосы вырезались из горячекатаного листа. Тем не менее, полученные данные в рамках каждой из серий экспериментов являются величинами одного порядка, что может служить основанием для положительного заключения о пригодности предложенной модели для определения степени и характера взаимодействия пластических и упругих частей полос при их многократном упруго-пластическом изгибе с убывающей кривизной на роликотправильной машине с целью оценки упрочнения при такой обработке. Сказанное относится к полосам из технической чистой меди, подвергнутым предварительной смягчающей термической обработке, после которой металл обладал низким уровнем условного предела текучести и высоким потенциалом деформационной способности.

Результаты, полученные аналитически с использованием предложенной методики «точечного контакта листа и ролика», хорошо согласуются с данными других исследователей, что подтверждает её применимость к расчёту геометрических и деформационных параметров правки листа. Ясно, что управление свойствами листового материала посредством знакопеременной деформации невозможно без объективной информации о механических свойствах обрабатываемого металла, естественным источником которой являются данные испытаний на растяжение. Установлено, что кривые течения, полученные по этим данным, могут использоваться для прогнозирования степени упрочнения при холодной пластической деформации, в частности знакопеременном упругопластическом изгибе. При этом результаты экспериментов по обработке на роликотправильной машине полос из технической чистой меди показали удовлетворительное соответствие предложенной модели расчёта реальным условиям деформации на указанной машине, причём за один проход удаётся повысить предел текучести технической чистой листовой меди в 3-5 раз при незначительном снижении относительного удлинения.

*Работа выполнялась по государственному заданию № 007-00129-18-00*

## Литература

1. Шелест, А.Е. Разработка методики определения геометрических и деформационных параметров правки металлических листов на роликотправильных машинах /

- А.Е.Шелест, В.С.Юсупов, М.М.Перкас, Е.Н.Шефтель, В.В.Просвирнин, К.Э.Акопян – Производство проката, № 3, 2016. С. 3-8.
2. Василев Я.Д., Сафьян М.М. Производство полосовой и листовой стали // Киев: Вища школа, 1975. 191 с.
  3. Недорезов И.В. Моделирование процесса правки проката на роликовых машинах // Екатеринбург: АКВА-ПРЕСС. 2003. 256 с.
  4. Недорезов И.В. Основные подходы к моделированию процессов правки проката на роликовых машинах / Непрерывные процессы обработки давлением. Труды Всероссийской научно-технической конференции. (Москва, 14-15 апреля 2004 г.) // МГТУ им. Н.Э.Баумана. – М. 2004. 440 с. (С. 179-184).
  5. Шинкин В.Н., Барыков А.М. Расчет технологических параметров холодной правки стального листа на девятироликовой листопрямляющей машине SMS Siemag металлургического комплекса стан-5000 // Производство проката. 2014. № 5. С. 7-15.
  6. Шинкин, В.Н. Расчет технологических параметров правки тонкой стальной полосы на пятнадцатироликовой листопрямляющей машине фирмы Fagor Agrasate // Молодой ученый. 2015. № 10. С. 361-366.
  7. Голи-Оглу Е.А., Алистаев А.Н., Гоношенко И.В., Порошков А.В. Влияние параметров холодной знакопеременной деформации изгибом на свойства низколегированных трубных сталей классов прочности К56-К65 // Сталь. 2014. № 2. С.65-70.
  8. Богатов А.А., Пузырев С.С. Особенности формоизменения и упрочнения металла при обработке давлением со знакопеременной деформацией // Производство проката. 2013. № 3. С. 2-8.
  9. Шелест А.Е. Уточнение методики построения кривых течения для прогнозирования упрочнения металлов при знакопеременной холодной пластической деформации [текст] / А.Е.Шелест, В.С.Юсупов, М.М.Перкас, Е.Н.Шефтель, В.В.Просвирнин, К.Э.Акопян // Металлы, № 5, 2017, с. 89-95.
  10. Аверкиев, Ю.А. Технология холодной штамповки: Учебник для вузов / Ю.А.Аверкиев, А.Ю.Аверкиев – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с., ил.
  11. ГОСТ 11701-84 Металлы. Метод испытания на растяжение тонких листов и лент.
  12. Смирнов-Аляев, Г.А. Сопrotивление материалов пластическому деформированию. 3-е издание / Г.А.Смирнов-Аляев – Л.: Машиностроение, 1978. – 368 с., ил.
  13. Аверкиев, А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла /А.Ю.Аверкиев – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с., ил.
  14. Шелест А.Е. Разработка методики определения геометрических и деформационных параметров правки металлических листов на роликопрямляющих машинах [текст] / А.Е.Шелест, В.С.Юсупов, М.М.Перкас, Е.Н.Шефтель, В.В.Просвирнин, К.Э.Акопян // Производство проката, № 7, 2016, с. 3-8.
  15. ГОСТ 11701-84 «Металлы. Метод испытания на растяжение тонких листов и лент».
  16. Мезис В.Я. Влияние изменения знака холодной пластической деформации на некоторые свойства металла [текст]: Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук / Акад. наук СССР. Ин-т металлургии им. А.А.Байкова. – М.: [Изд-во Акад. наук СССР], 1958. – 20 с.
  17. <http://stanko-group.net/katalog/stanki-dlya-obrabotki-lista/ustanovki-pravki-lista/precizionnyy-pravilnyy-standok-ecomaster-2/>