

УДК 669: 621.771.

*к.т.н. Огинский И. К.
(Национальная металлургическая академия Украины, Днепронетровск, Украина, oginskyu@googlemail.com)*

РАБОТА И МОМЕНТЫ ПРИ ПРОКАТКЕ В НЕСИММЕТРИЧНЫХ КАЛИБРАХ

Выполнен анализ существующих подходов к определению энергосиловых параметров при сортовой прокатке, дано обоснование целесообразности развития методов на основе смещенного объема. Предложен метод определения работы и момента при прокатке в несимметричных калибрах, в основе предлагаемых подходов лежит уточнение параметров объемного течения металла, использование принципа минимума расхода энергии. Предложен метод прямого определения момента прокатки на основе единичного объема. Использование названных подходов и принципов позволяет исключить участие в методах расчета работы и моментов трудноопределимых вспомогательных параметров прокатки (коэффициента трения, опережения и нейтрального угла).

Ключевые слова: прокатка, работа, момент, калибр, параметр, смещенный объем.

Виконано аналіз існуючих підходів до визначення енергосилових параметрів при сортовій прокатці, надано обґрунтування доцільності розвитку методів на основі зміщеного об'єму. Запропоновано метод визначення та моменту при прокатці в несиметричних калібрах, в основі запропонованих підходів є уточнення параметрів об'ємної течії металу, використання принципу мінімуму розходу енергії. Запропоновано метод прямого визначення моменту прокатки на основі одиничного об'єму. Використання даних підходів та принципів дозволяє виключити додаткові параметри прокатки, визначення яких викликає труднощі, (коефіцієнт тертя, випередження та нейтральний кут) в методах розрахунку роботи та моментів.

Ключові слова: прокатка, работа, момент, калибр, параметр, зміщений об'єм.

Характер распределения моментов между валками при прокатке в несимметричных калибрах всегда вызывал большой практический и научный интерес. Неравномерное распределение нагрузок между валками и элементами главной линии стана ухудшает условия их работы вслед-

ствие появления дополнительных динамических нагрузок, вызывает опасность создания аварийных ситуаций. Причиной возможной поломки валков становится чрезмерная перегрузка одного из них, в то время как суммарный момент (момент прокатки) может не превышать допустимого. Несимметричные случаи прокатки в практике встречаются достаточно часто и они являются объектом многих исследований, но теоретические решения созданы лишь для простых случаев прокатки [1 и др.]. Решения технологических задач, связанных с прокаткой в несимметричных калибрах, основываются большей частью на практических рекомендациях, теоретические положения продолжают оставаться недостаточно раскрытыми, в частности, не созданы методы определения суммарного момента (момента прокатки).

Существующие методы определения энергосиловых параметров при прокатке по своим физическим подходам могут быть представлены двумя группами. Первыми возникли методы, в основе которых объемные характеристики очага деформации, создателем методов первой группы является Финк, который ввел понятие смещенный объем при прокатке. В основе методов первой группы, наряду со смещенным объемом, лежат другие признаки объемного течения металла, выраженные в виде коэффициентов и не имеющие характерных названий. В основе методов второй группы лежит контактное взаимодействие металла с валками и в определении энергосиловых параметров методами второй группы участвуют: контактные напряжения; коэффициент внешнего трения; величины, характеризующие взаимное перемещение металла и валков – опережение, скольжение и нейтральный угол. Определение каждого параметра всегда связано с погрешностями, в итоге, необходимая точность расчетов становится недостижимой. Методы второй группы получили большее развитие и распространение, не смотря на то, что они ставятся в зависимость от большого числа факторов, которые в свою очередь, являются трудноопределимыми и не всегда однозначными. В методах второй группы не всегда достаточно корректно отражена физическая сущность выше упомянутых характеристик. Коэффициент внешнего трения при прокатке не имеет однозначного физического смысла [2, 3] по причине того, что на контакте существуют два вида внешнего трения – покоя и скольжения (зоны скольжения и прилипания). Нейтральный угол, будучи одним из признаков методов первой группы, является также недостаточно однозначной величиной, поскольку его проявление ставят в зависимость от опережения при прокатке, которое, как принято считать, зависит от условий контактного взаимодействия [4; 5 и др.]. Отсутствует единство мнений о механизме образования опережения и его взаимосвязи с другими параметрами [6; 7], что ставит под сомнение достаточно полную физическую корректность ме-

тодов первой группы. К методам первой группы можно отнести и энергетические методы [8], поскольку в них энергосиловые параметры также ставятся в зависимость от контактного взаимодействия, в частности, от нейтрального угла. Трение при прокатке является основным и одновременно малоизученным фактором. Существуют различные точки зрения на природу внешнего трения при прокатке, по-разному воспринимается применимость законов и моделей трения [9-15]. Единство мнений по вопросам контактного взаимодействия не достигнуто, обсуждение порой носит острый дискуссионный характер [11-14]. Приведенные признаки состояния теории пластического трения [9-15], спорность положений в части природы опережения [5; 6; 15] свидетельствуют о том, что точность определения энергосиловых параметров методами второй группы не может быть достаточно высокой, в частности, возникают затруднения при определении момента прокатки и работы через силу внешнего трения и нейтральный угол. Еще в большей степени проблемной становится задача определения работы и момента для случаев прокатки в калибрах, уже по той причине, что в очаге деформации, ограниченном сложными пространственными поверхностями, не могут быть использованы такие понятия как опережение и нейтральный угол, поскольку применительно к калибру они утрачивают свою определенность и однозначность.

Целью настоящей работы является анализ существующих подходов к определению энергосиловых параметров и развитие методов их определения, создание метода определения работы и момента при прокатке в калибрах; целью является также анализ и уточнение подходов к определению параметров прокатки, влияющих на характер распределения моментов на валки, разработка теоретического метода определения отношения моментов на валках при прокатке в несимметричных калибрах. В основе предлагаемых подходов лежит уточнение признаков объемного течения металла, использование принципа минимума расхода энергии. На основе развития и уточнения названных подходов и признаков становится возможным исключить прямое участие в методах расчета работы и моментов трудноопределимых вспомогательных параметров прокатки (коэффициента трения, опережения и нейтрального угла) и тем самым приблизиться к необходимой точности решения прикладных задач.

Методы первой группы отличаются подходами к определению смещенного объема. Формула Финка имеет следующий вид:

$$A = p V \ln \frac{h_0}{h_1}. \quad (1)$$

Формула (1) предназначена только для случаев прокатки на гладкой бочки без уширения. Предпринимались попытки расширить подход Финка, Тафель в одной из своих работ придает формуле (1) следующий вид:

$$A = p V \ln \lambda . \quad (2)$$

В таком виде выражение (2) становится известным под именем формулы Киссельбаха-Гульста, считается, что оно учитывает уширение. Прейслером была предпринята попытка учесть работу сложного формоизменения, в результате получено выражение, имеющее вид:

$$A = p V \ln \frac{h_1 b_1 l_1}{V} . \quad (3)$$

Приведенные выражения включают отношение линейных размеров и не содержит какие-либо параметры, характеризующие объемное течение металла. Все полученные другими авторами (в установлении объемных признаков течения металла принимали участие Вейс, Кирхберг, Герман, Зибель, Грасгоф, Кодрон, Пупе, Виноградов, Гавриленко, Верещагин, Лисс, Петров и другие) зависимости являются упрощенными и также не отражают какой-либо картины объемных перемещений металла, исследователям не удалось выявить смещенный объем среди других объемных признаков очага деформации. Смещенный объем, будучи составляющей энергетической характеристики процесса прокатки (работы прокатки), должен иметь, своего рода, «энергетическое наполнение», он должен ставиться в прямое соответствие величине затраченной работе. Задача состоит в том, чтобы из возможных объемных перемещений в очаге деформации выявить то, которое в наибольшей степени отвечает затраченной работе.

Физические основы смещенного объема и его характерные признаки с достаточной определенностью проявляются при прокатке на гладкой бочке, задача определения названного объема выходит за рамки настоящей работы и, кроме того, применимость метода в прямом виде (с признаками прокатки на гладкой бочке) для стоящей задачи ограничена. Рассмотрим в качестве примера прокатку прямоугольной полосы в разрезном открытом калибре, который по совокупности представляет собой практически все достаточно характерные признаки рассматриваемого процесса. На первом этапе ограничимся рассмотрением прокатки без уширения.

Выделим наиболее характерные объемные признаки очага деформации, среди которых могут быть те, которые в наибольшей степени

соответствуют представлениям о смещенном объеме как энергетической составляющей работы. Выявление характерных объемов и связанных с ними других параметров должно базироваться на физически обоснованном определении положения раската в калибре. Проблема прогнозирования положения раската в калибре при несимметричной прокатке возникла у исследователей, начиная с периода освоения первых фасонных профилей, в настоящее время она не утратила своей остроты. Созданные подходы не содержат в своей основе каких-либо достаточно глубоких физических предпосылок, поскольку базируются на геометрических взаимосвязях. Положение раската в калибре должно подчиняться законам механики, в которых отображается равновесие системы валки-металл в вертикальном направлении и выполнение энергетического принципа минимума работы, На рисунке 1 показаны области V_{OC1} и V_{OC2} , которые могут быть представлены как объемы, отделенные от основного металла в результате его осадки валками. Если бы речь шла о процессе осадки в чистом виде, то сумму названных объемов можно было назвать смещенным объемом в вертикальном направлении (которое является одним из главных), поскольку в теории ОМД принято считать [16]; «Смещенный объем – это прибавленный или удаленный в процессе деформирования объем в одном из главных направлений». Механизм процесса прокатки является более сложным, поскольку включает характерные признаки осадки, волочения и свои собственные и выделить смещенные объемы по главным направлениям не представляется возможным. Нельзя с уверенностью сказать какая часть объема, находящегося в очаге деформации, за определенный период времени (например, за время поворота валка на угол α) сместится в вертикальном направлении, в продольном и поперечном направлениях и, наконец, какой объем останется в границах очага деформации. Теория прокатки в настоящее время не располагает подобными сведениями. Если исходить из условия, что система валки-металл является самоуравновешивающейся и смещенный объем является количественной мерой затраченной работы, то металл, условно осаженный со стороны обеих валков в вертикальном направлении (при определенном конечном перемещении), должен занимать минимальный суммарный объем:

$$V_{OC} = \min(V_{OC1} + V_{OC2}). \quad (4)$$

Условие (4) соответствует принципу минимума работы.

Объем V_{OC} является вспомогательным параметром, собственно смещенный объем (как объемная составляющая энергозатрат) проявляется в перемещениях основного направления металла.

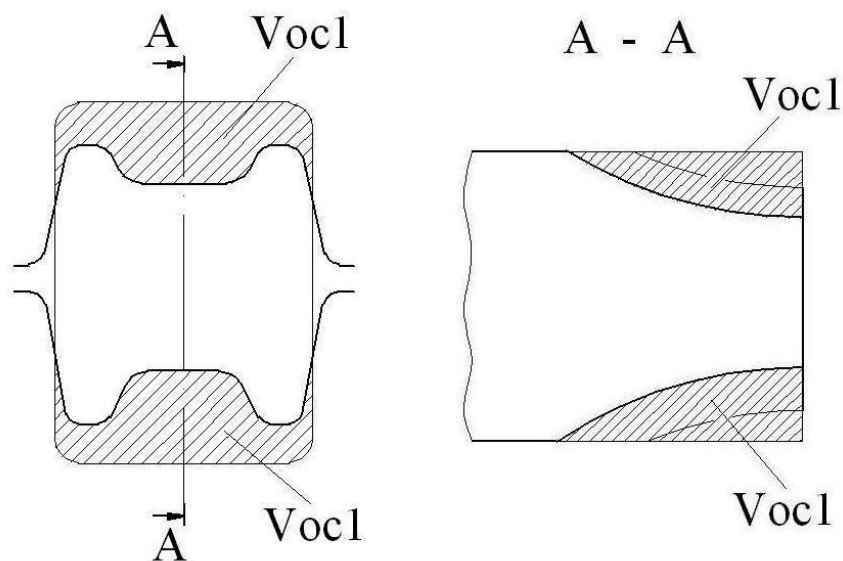


Рисунок 1 – Разрезной калибр и задаваемый раскат

Основным направлением движения металла является такое, где он движется по траекториям, близким к направлению действующего внешнего усилия – силы момента прокатки. Поскольку валки имеют только возможность вращения и неподвижны в поперечном направлении, а вертикальные перемещения металла являются составляющими главного потока, то объем V_{OC} может быть охарактеризован как условно осаженный объем.

Работу определим на основе подхода Финка, вводится понятие единичная работа A_e – работа, совершаемая за время поворота валка на угол α :

$$A_e = V_c \sigma_{TC}, \quad (5)$$

V_c – единичный смещенный объем – объем, смещенный при повороте валка на угол α_{np} ;

σ_{TC} – среднее по объему напряжение текучести.

Физический очаг деформации представляет собой весьма сложную картину его границы во входной части не могут быть обозначены, как это принято при простых случаях прокатки, углом контакта α и необходимым становится введение допущений. Положение входной границы может быть выражено через приведенный угол контакта α_{np} , который определяется из выражения:

$$\alpha_{np} = \arcsin \frac{2V_{oc}}{\Delta F} \frac{1}{R_K}. \quad (6)$$

В свою очередь входящие в выражение (6) параметры имеют следующие значения:

$$\frac{2V_{oc}}{\Delta F} = l_{np}, \quad (7)$$

$$\Delta F = F_0 - F_1, \quad (8)$$

l_{np} - приведенная длина очага деформации;

F_0 и F_1 - площади поперечного сечения раската до прокатки и после, соответственно;

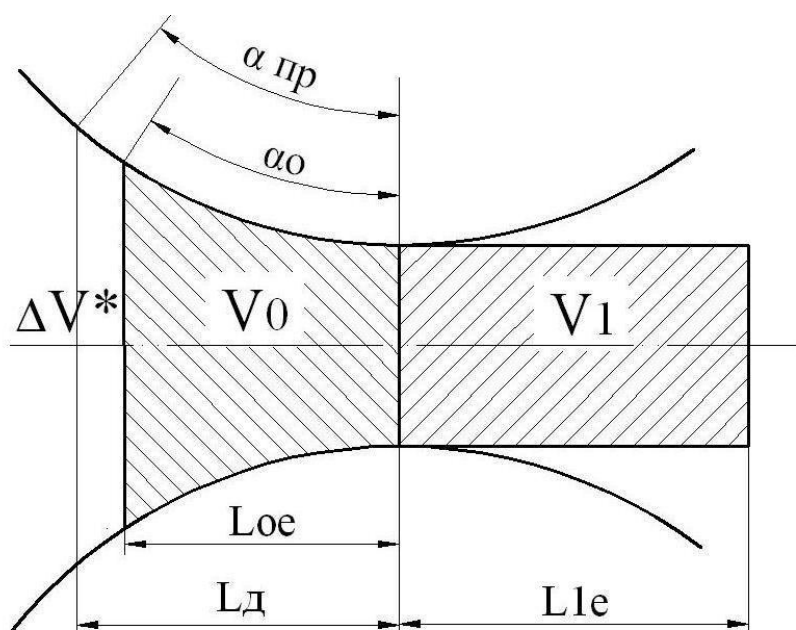
R_K - катающий радиус (радиус, при котором окружная скорость валков равна скорости раската после его прокатки).

На основе выражения (6) и входящих в него параметров становится возможным рассмотрение объемных признаков очага деформации, используя элементы простого случая прокатки представленного на рисунке 2. Исходным является единичный объем V_e , он заключен между рабочими поверхностями валков и границами входа металла в валки и выхода из них. Граница на выходе лежит в плоскости осей валков, на входе условной границей очага деформации является плоскость, соответствующая углу α_{np} . Единичный объем можно представить в виде двух характерных объемов (частей) – за время поворота валка на угол α_{np} часть металла V_1 выходит за пределы плоскости валков, а вторая ΔV остается в очаге деформации в его выходной области. Указанный факт был выявлен на основе анализа картины объемных перемещений металла в очаге деформации и подтвержден экспериментально. Названное обстоятельство не привлекало внимание исследователей, вместе с тем, оно является весьма существенным и одним из элементов в построении картины смещенного объема. Объем V_1 определяется следующим образом:

$$V_1 = R_K \alpha_{np} F_1, \quad (9)$$

где

$$R_K \alpha_{np} = l_{np}. \quad (10)$$



ΔV^* – объем, равный по величине остаточному объему ΔV ;
 V_1 – объем, вышедший из очага деформации за период поворота валка на угол α ;
 V_0 – объем, которому предстоит выйти из очага деформации после поворота валка на угол $\alpha(V_0 - V_1)$.

Рисунок 2 – Объемные признаки очага деформации

Вводится вспомогательный объемный параметр V_0 , это объем, которому предстоит выйти из очага деформации за период поворота валка на угол $\alpha_{пр}$, численно он равен объему V_1 :

$$V_0 = V_1. \quad (11)$$

Единичный смещенный объем V_c формируется в пределах V_0 , который включает два типа характерных объемов представленных на рисунке 3: примыкающие к валкам V_c^* , и, находящийся между ними, длиной равной l_{le} . Объемы V_c^* при повороте валка на угол α перемещаются и приобретают форму объема V_1 . Объемы V_c^* в сумме представляют собой единичный смещенный объем V_c :

$$V_c = V_0 - F_1 R_K \sin \alpha_0. \quad (12)$$

Величины V_0 и α_0 находятся из геометрических взаимосвязей в соответствии с рисунком 3. Соответственно выражение для определения единичной работы примет вид:

$$A_e = F_l (R_K \arcsin \frac{2V_{OC}}{\Delta F R_K} - R_K \sin \alpha_o) \sigma_{TC}. \quad (13)$$

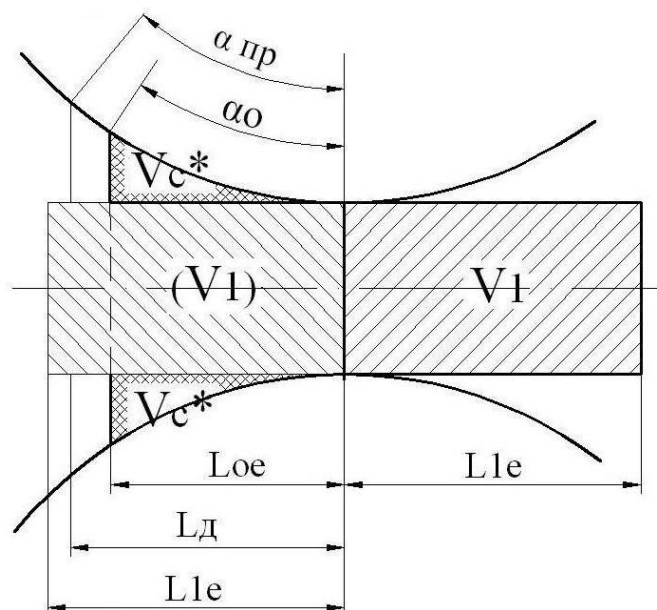


Рисунок 3 – Составляющие смещенного объема

Катающий радиус R_K обычно определяют из геометрических соотношений [17]. Для более точного определения R_K можно рекомендовать метод, который заключается в следующем. При прокатке замеряется угол поворота вала φ и расстояние l_φ , которое проходит передний конец раската, за этот же период времени. Катающий радиус определяется из соотношения:

$$R_K = l_\varphi / \varphi. \quad (14)$$

Момент прокатки определяется на основе единичной работы:

$$M = A_e / \alpha_{pr}. \quad (15)$$

Распределение моментов между валками является сложной многофакторной задачей, правильность ее решения во многом предопреде-

лена нахождением положения раската в калибре. Анализ результатов экспериментальных исследований, выполненных автором [18] для случая прокатки двутавровой балки в закрытых балочных калибрах, позволяет рекомендовать для определения характера распределение моментов между валками следующую зависимость:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{F_{к1}}{F_{к2}}, \quad (16)$$

где $F_{к1}$ и $F_{к2}$ – площади контактных поверхности каждого из валков.

Прокатка, проведенная авторами [18], была промоделирована в тех же условиях на основе вышеизложенных положений. Фрагменты промежуточных результатов расчета приведены на рисунке 4. Результаты расчетов и экспериментов приведены в таблице 1, сравнение показывает достаточно высокую их сходимость.

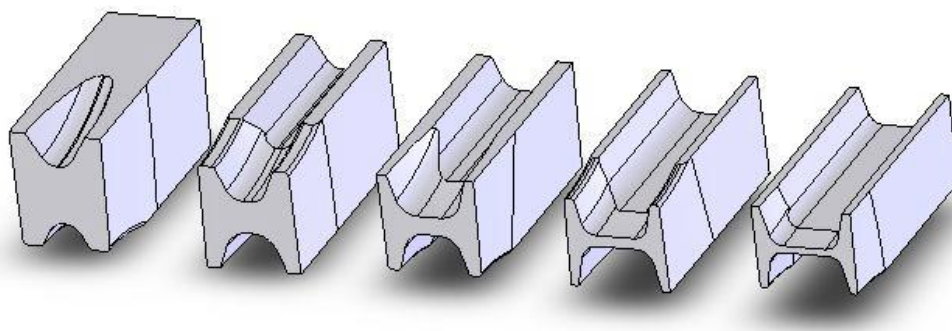


Рисунок 4 – К расчету отношения M_1 / M_2 в работе [18]

Таблица 1 – Сравнение результатов расчета M_1/M_2 для прокатки двутавровой балки с экспериментальными данными ($M_{закр}$ – момент на валке, несущем закрытый ручей; $M_{пр}$ – момент прокатки)

№ калибра	тип калибра	$M_{закр} / M_{пр}$		Относительная погрешность, %
		расчет	эксперимент	
1	разрезной закрытый	0,824	0,833	– 1,1
2	закрытый	0,774	0,842	– 8,1
3	закрытый	0,736	0,878	– 16,2
4	закрытый	0,723	0,872	– 17,1
5	закрытый	0,784	0,933	– 16,0

Выражение (15) является приближенным, более строгий учет факторов должен включать, по меньшей мере, напряжения на контакте каждого из валков:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{p_{c1}}{p_{c2}} \frac{F_{\kappa 1}}{F_{\kappa 2}}, \quad (17)$$

где p_{c1} и p_{c2} – средние давления на контакте каждого из валков.

Выводы. В работе выполнен анализ существующих подходов к определению энергосиловых параметров при сортовой прокатке, дано обоснование целесообразности развития методов на основе смещенного объема. Предложен метод определения работы и момента при прокатке в несимметричных калибрах, в основе предлагаемых подходов лежит уточнение параметров объемного течения металла, использование принципа минимума расхода энергии. Предложен метод прямого определения момента прокатки на основе единичного объема. Использование названных подходов и принципов позволяет исключить участие в методах расчета работы и моментов трудноопределимых вспомогательных параметров прокатки (коэффициента трения, опережения и нейтрального угла) и тем самым повысить точность решения прикладных задач.

Библиографический список

1. Николаев В.А. Силовые параметры в несимметричных условиях прокатки / Известия вузов, Черная металлургия.- 2007. - № 9. -С. 22-23.
2. Грудев А.П. Внешнее трение при прокатке. - М.: Металлургия, 1973. - 288 с.
3. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А.Н. Леванов, В.Л. Колмогоров, С.П. Буркин и др. – М.: Металлургия, 1976. - 416 с.
4. Павлов И.М. Теория прокатки. - М.: Металлургиздат, 1950. 610 с.
5. Целиков А.И. Основы теории прокатки. – М.: Металлургия, 1965.- 247с.
6. Долженков Ф.Е. О некоторых противоречиях современной теории прокатки // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 5. Пластична деформація металів. - Дніпропетровськ: «Системні технології», 2002. - С. 353-355.
7. Долженков Ф.Е. Уширение, опережения и вытяжка при продольной прокатке (О некоторых противоречиях современной теории прокатки) // Известия вузов, ЧМ. – 2003. - № 6. - С. 41-44.

8. Выдрин В.Н. Динамика прокатных станов. - М.: Металлургиздат, Свердловское отделение, 1960. – 255 с.
9. Василев Я.Д. Модель напряжений трения при прокатке // Производство проката. - 1998. - № 6. - С. 2-8.
10. Василев Я.Д. Уточнение модели напряжений трения при прокатке // Известия вузов, ЧМ. - 2000. - № 11. - С. 22-24.
11. Зильберг Ю.В. Закон и модели пластического трения // Известия вузов, ЧМ. - 2000. - № 11. - С. 22-24.
12. Хайкин Б.Е. Рецензия на статью Ю.В. Зильберга «Закон и модели пластического трения» // Известия вузов, Черная металлургия. - 2000. - № 11. - С. 24-25.
13. Ответы автора Ю.В. Зильберга на замечания рецензента Б.Е. Хайкина. / Известия вузов, Черная металлургия. - 2000. - № 11. - С. 25.
14. Хайкин Б.Е. Операционалистический подход к проблеме трения в условиях обработки металлов давлением / Б.Е. Хайкин // Известия вузов, Черная металлургия. – 2000. - № 11. - С. 26-27.
15. Зильберг Ю.В. О некоторых противоречиях и допущениях теории прокатки / Ю.В. Зильберг // Известия вузов, Черная металлургия. - 2004. - № 11. - С. 24-26.
16. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением / Н.П. Громов. – М.: Металлургия, 1967. – 340 с.
17. Илюкович Б.М. Прокатка и калибровка. Справочник. Том 1. / Б.М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев. - Днепропетровск. РВА Дніпро-Вал. – 506 с.
18. Теряев В. А. О площадях контакта металла с валком при прокатке балок в обычных и универсальных калибрах / В. А. Теряев, Ю. В. Павлович // Прокатное производство: сб. научн. тр. ИЧМ. - М.: Металлургия. - 1969. - Вып. 29. - С. 146-154.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Луценко В.А.