

УДК 621.771.001.23

Василев Я. Д.
Самокиш Д. Н.
Замогильный Р. А.
Железнов Д. В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАТЯЖЕНИЯ НА СИЛУ ПРОКАТКИ И КРИВЫЕ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ

Пластическая деформация металла при прокатке осуществляется в результате совместного силового, фрикционного, упруго-пластического, теплового и кинематического взаимодействия полосы с валками [1, 2]. Количественной мерой этого взаимодействия является сила прокатки. В случаях, когда процесс прокатки реализуется без воздействия внешних сил на полосу, уровень силы прокатки определяется механическими и реологическими свойствами деформируемого металла, коэффициентом трения, а также деформационными и температурно-скоростными условиями прокатки. Если на полосу в процессе прокатки действуют внешние силы в виде натяжения или подпора, уровень силы прокатки существенно меняется. Под действием натяжения или подпора в сечениях входа и выхода очага деформации появляются дополнительные продольные растягивающие или подпирющие напряжения, которые приводят соответственно к уменьшению или к увеличению силы прокатки. Поэтому натяжение или подпор становятся неотъемлемыми параметрами процесса полосовой прокатки [1–3].

Холодная полосовая прокатка предназначена для получения тонкого плоского проката толщиной обычно 0,8...1,2 мм и менее, отличающегося высокими показателями качества и пользующегося повышенным спросом [4]. Отличительной особенностью данного процесса является то, что пластическая деформация металла валками осуществляется всегда с натяжением и режимы натяжений, наряду с режимами обжатий, являются важнейшими элементами технологии холодной прокатки. Величина относительных натяжений q/σ_T (где q , σ_T – напряжение натяжения и предел текучести материала полосы, Н/мм²) при холодной полосовой прокатке находятся в пределах от 0,10...0,15 до 0,30...0,45 и обычно не превышают 0,5 [2]. Натяжение уменьшает контактные напряжения и силу прокатки, способствуют выравниванию вытяжек по ширине, а также уменьшению неплоскостности и разнотолщинности полосы. По этой причине натяжение используется в качестве канала воздействия на толщину, профиль и форму (плоскостность) полосы в системах автоматического регулирования САРТ, САРН (САРТиН) и САРПФ, которыми оснащены современные станы холодной прокатки [5–7]. Сравнительно недавно было теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что натяжение при холодной полосовой прокатке оказывает также существенное влияние на уровень потребляемой мощности (удельный расход энергии) и представляет собой неиспользованный до сих пор резерв для повышения энергетической эффективности процесса [8–11].

Из изложенного следует, что использование возможностей натяжения для уменьшения разнотолщинности и улучшение плоскостности холоднокатаных полос, а также для уменьшения потребляемой мощности (удельного расхода энергии) при холодной прокатке предполагает наличие точной информации о силе прокатки. Это логично, поскольку сила прокатки, как интегральная характеристика взаимодействия полосы с вращающимися валками, отражает совместное количественное влияние всех технологических параметров процесса холодной прокатки. Кроме того, использование силы прокатки в качестве канала воздействия на параметры точности прокатываемых полос в системах САРТ, САРН (САРТиН) и САРПФ, а также в качестве критерия энергетической эффективности процесса холодной прокатки целесообразно еще и потому, что сегодня наиболее точные и надежные экспериментальные данные о технологических параметрах на промышленных станах холодной прокатки получают практически только о силе прокатки.

Опыт показывает, что использование аппарата современной теории холодной прокатки [1, 2] обеспечивает прогнозирование основных технологических параметров данного процесса с удовлетворительной точностью и надежностью [12]. Однако для этого необходима точная и надежная информация об исходных данных процесса, поступающая в реальном масштабе времени, либо с упреждением. Выполнение этой задачи возможно но трудноосуществимо в производственных условиях. Поэтому информация об исходных данных на многих действующих станах обычно не поступает. Исходя из этого и учитывая стохастический характер изменения исходных данных, следует отметить, что реальный процесс холодной прокатки на промышленных станах характеризуется значительной нестабильностью технологических параметров, в том числе и силы прокатки. Это снижает эффективность работы соответствующих систем регулирования и управления. Поэтому получение экспериментальных данных о силе прокатки с учетом влияния натяжения актуально.

Целью работы является экспериментальное исследование влияния натяжения на силу прокатки и построение экспериментальных кривых пластичности при холодной прокатке с натяжением. Экспериментальные исследования о влиянии натяжения на силу прокатки P_3 проводили на двухвалковом стане 210, установленном в лаборатории кафедры обработки металлов давлением Национальной металлургической академии Украины (г. Днепр, Украина). Для реализации процесса холодной прокатки с натяжением стан 210 был оснащен экспериментальной установкой¹, позволяющей изменять переднее и заднее относительное натяжение q/σ_T (где q , σ_T – напряжение натяжения и предел текучести материала полосы) при прокатке в пределах от 0 до 0,5. При проведении экспериментов в рабочую клетку стана 210 были установлены валки специальной конструкции из стали 9ХФ, с малой длиной бочки L ($L=44,5$ мм), что позволило исключить влияние забоя свободных участков бочек валков на силу прокатки. Твердость и шероховатость поверхности бочек валков составляли соответственно 92–95 HSD и $R_a = 0,6$ мкм. Прокатывали полосы 0,5x20 мм из отожженной стали 08кп со скоростью 0,148 м/с без применения технологической смазки с частными относительными обжатиями ε и относительными натяжениями q/σ_T , равными соответственно 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 и 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5. В ходе экспериментов измеряли толщину и ширину образцов (полос) до и после прокатки с точностью 0,01 мм, а также опережение, натяжение и силу прокатки. При одной установке валков, т.е для каждого обжатия и натяжения прокатывали по 5 образцов. Перед прокаткой каждой серии образцов валки и полосы тщательно обезжировали ацетоном.

Кривая упрочнения σ_{TE} стали 08кп конкретного состава, т.е. материала прокатываемых полос, была построена по данным испытания образцов на растяжение с разной степенью предварительного наклепа ε_Σ ($\varepsilon_\Sigma=0,05\dots 0,80$) и аппроксимирована уравнением:

$$\sigma_{TE} = 260 + 34,6(100 \varepsilon_\Sigma)^{0,6} \quad (1)$$

Результаты экспериментального определения силы прокатки P_3 , заднего Q_0 и переднего Q_1 натяжений обрабатывались статистически по стандартным программам. Полученные после статистической обработки экспериментальные данные о среднестатистических значениях силы прокатки P_3 , сил заднего Q_0 и переднего Q_1 натяжений были использованы для определения фактических величин относительных задних q_0/σ_{T0} (где q_0 , σ_{T0} – напряжение натяжения и предел текучести материала полосы на входе в очаг деформации) и передних q_1/σ_{T1} (где q_1 , σ_{T1} – напряжение натяжения и предел текучести материала полосы на выходе из очага деформации) натяжений. По этим данным были построены экспериментальные зависимости $P_3 = \varphi(\varepsilon)$ (где ε – относительное обжатие) и $P_3 = \varphi(h_1)$ (где h_1 – толщина полосы на выходе из очага деформации) при холодной прокатке с одним передним, с одним задним и с двумя одинаковыми относительными натяжениями. На рис. 1, в качестве примера, приведены экспериментальные кривые $P_3 = \varphi(\varepsilon)$, зафиксированные при прокатке с двумя одинаковыми относительными натяжениями ($q_0/\sigma_{T0}=q_1/\sigma_{T1}$).

¹ Установка спроектирована и реализована Д.Н.Самокишем.

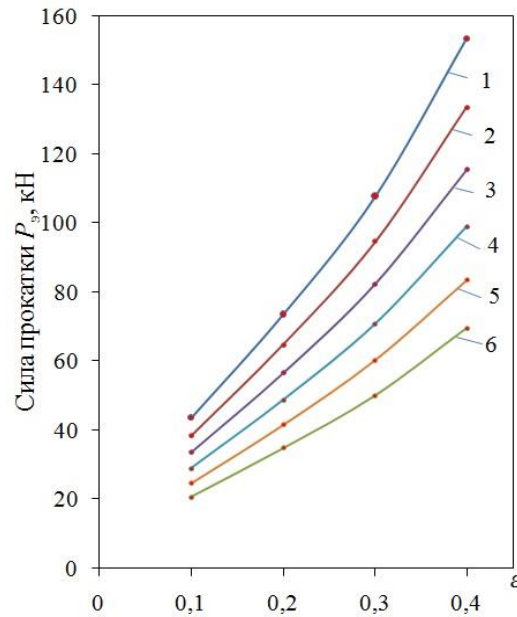


Рис. 1. Экспериментальные зависимости $P_3 = \varphi(\varepsilon)$, построенные по результатам прокатки с двумя одинаковыми относительными натяжениями:

1 – $q_0/\sigma_{T0}=q_1/\sigma_{T1}=0$; 2 – то же 0,1; 3 – то же 0,2; 4 – то же 0,3; 5 – то же 0,4; 6 – то же 0,5

Зависимости $P_3 = \varphi(\varepsilon)$, полученные при прокатке с одним передним и с одним задним относительным натяжением качественно совпадают с представленными на рис. 1 кривыми. Они отличаются от них только количественно.

Из рис. 1 видно, что с увеличением уровня относительных натяжений сила прокатки уменьшается. При $q_0/\sigma_{T0}=q_1/\sigma_{T1}=0,5$ уменьшение силы (кривая 6) по сравнению с прокаткой без натяжения (кривая 1) составляет 50...53%. При прокатке с одним передним и с одним задним натяжением в рассматриваемых условиях деформации зафиксировано практически одинаковое, но более скромное (примерно на 30...33%) уменьшение силы прокатки.

На рис. 2 приведено сравнение результатов экспериментального и теоретического исследования силы прокатки с натяжением. Расчет силы прокатки с натяжением производили по методике [13], при создании которой были учтены последние достижения современной теории холодной прокатки [1, 2]. Как следует из рис.2 расхождения между расчетными и экспериментальными данными не превышает 6...9 %, что свидетельствует об удовлетворительной точности прогнозирования силы прокатки с натяжением.

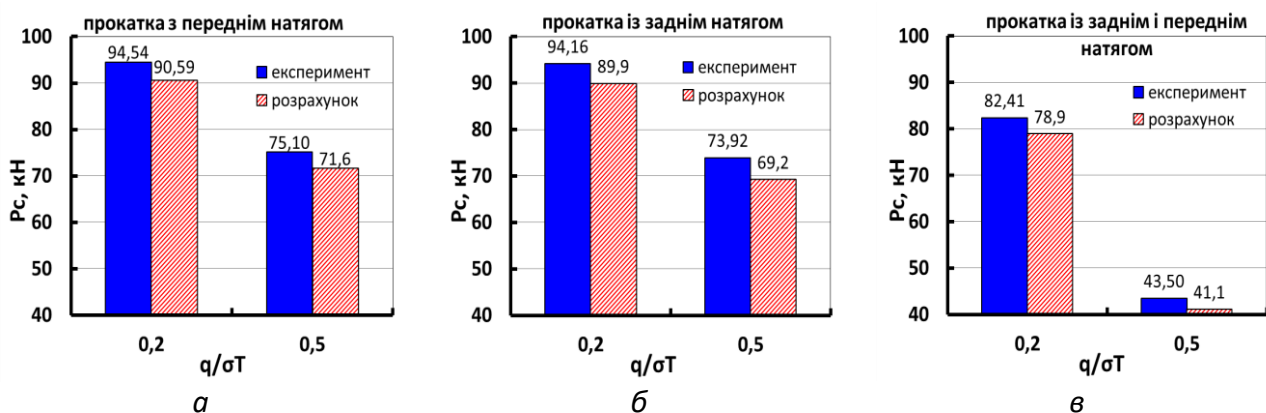


Рис. 2. Сравнение результатов экспериментального и теоретического исследования силы прокатки с натяжением

Рабочие клетки прокатных станов не являются идеально жесткими и толщина полосы на выходе из очага деформации h_1 (мм) зависит от уровня силы прокатки P (МН) и модуля жесткости рабочей клетки $M_{кл}$ (МН/мм). Поэтому однозначное определение величин h_1 и P осуществляется в результате решения системы [3,5,7,14]:

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= S_0 + P/M_{кл} \\ P &= \varphi(h_1) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где S_0 – зазор между валками до прокатки, мм

Первое уравнение системы (2), известное под названием «уравнение упругой линии клетки» выражается практически прямой линией. Уравнение $P=\varphi(h_1)$ называют уравнением пластической деформации, а графические зависимости, построенные по этому уравнению – кривыми пластичности. Отношение $P/M_{кл}$ численно равно упругой деформации клетки $\delta_{кл}$ в мм. При $h_1 = \delta_{кл}$ $S_0=0$. В случаях, когда $h_1 < \delta_{кл}$ зазор между валками приобретает отрицательные значения и процесс прокатки осуществляют в предварительно прижатых валках силой P_3 (где P_3 – сила «забоя» валков, МН). Тогда система (2) записывается в виде [7,14]:

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= (P - P_3)/M_{кл} \\ P &= \varphi(h_1) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Основные трудности при решении систем (2) и (3) связаны с решением уравнения $P=\varphi(h_1)$. Взаимосвязь силы прокатки P с толщиной полосы h_1 является сложной функцией, зависящей от многих параметров (толщины, ширины и предела текучести исходной заготовки, обжатия, коэффициента трения, радиуса рабочих валков, натяжения, температуры деформации, скорости прокатки и других факторов) и выражается графически кривой линией, вид которой показан на рис.3.

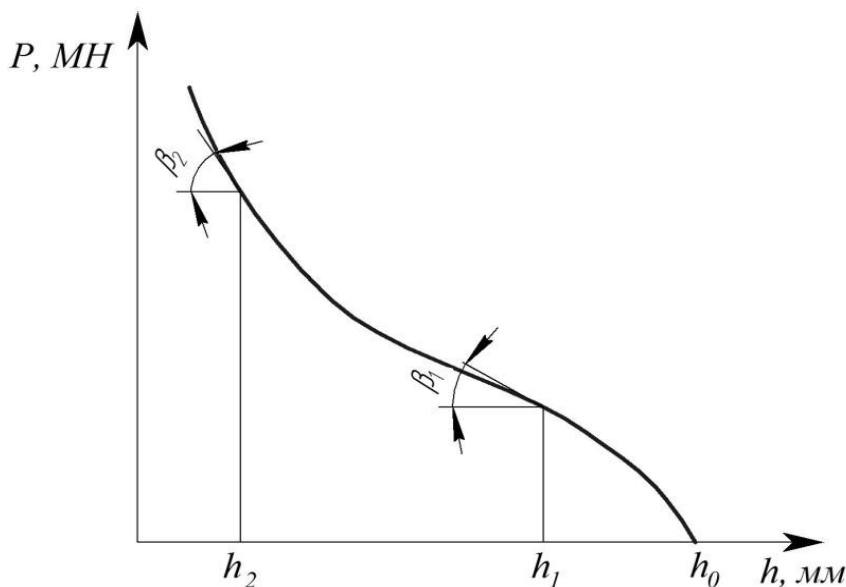


Рис. 3. Графическое решение уравнения пластической деформации ($P=\varphi(h_1)$)

Тангенс угла наклона β касательной к кривой пластичности (рис. 3) представляет собой модуль жесткости полосы $M_{п}$ ($M_{п}=\Delta P/\Delta h$). Модуль жесткости полосы – это сила прокатки, вызывающая изменение конечной толщины полосы на 1 мм. По аналогии с $M_{кл}$, $M_{п}$ измеряется в МН/мм. Как следует из рис. 3 модуль жесткости полосы величина непостоянная. Он увеличивается с увеличением деформации полосы ($\beta_2 > \beta_1$) и его значения изменяются в пределах от 4 до 200 МН/мм.

Большое влияние на модуль жесткости полосы оказывает натяжение при прокатке. Поэтому построение кривых пластичности при холодной прокатке с учетом влияния натяжения является актуальной задачей. Построение кривых пластичности при холодной прокатке с учетом влияния натяжения осуществляют обычно расчетным путем поскольку получение

экспериментальных зависимостей $P=\varphi(h_1)$ на промышленных станах связано с большими организационно-техническими трудностями. Однако при теоретическом построении кривых пластичности оценить количественно точно комплексное влияние натяжения на силу прокатки затруднительно, поскольку многие из используемых для этой цели моделей и решений являются приближенными. В этом смысле более предпочтительным и более точным является построение кривых пластичности при холодной прокатке с учетом влияния натяжения по экспериментальным данным, полученным в лабораторных условиях. Восполнению этого пробела могут способствовать полученные в ходе выполнения данной работы результаты.

На рис. 4 представлены экспериментальные кривые пластичности $P_3=\varphi(h_1)$, построенные по данным холодной прокатки полосы толщиной 0,5 мм на стане 210 с одним передним (а), одним задним (б) и с двумя одинаковыми (в) относительными натяжениями. Для сравнения на этих рисунках показаны также экспериментальные кривые пластичности $P_3=\varphi(h_1)$, полученные при прокатке без натяжения ($q_0/\sigma_{T0}=q_1/\sigma_{T1}=0$).

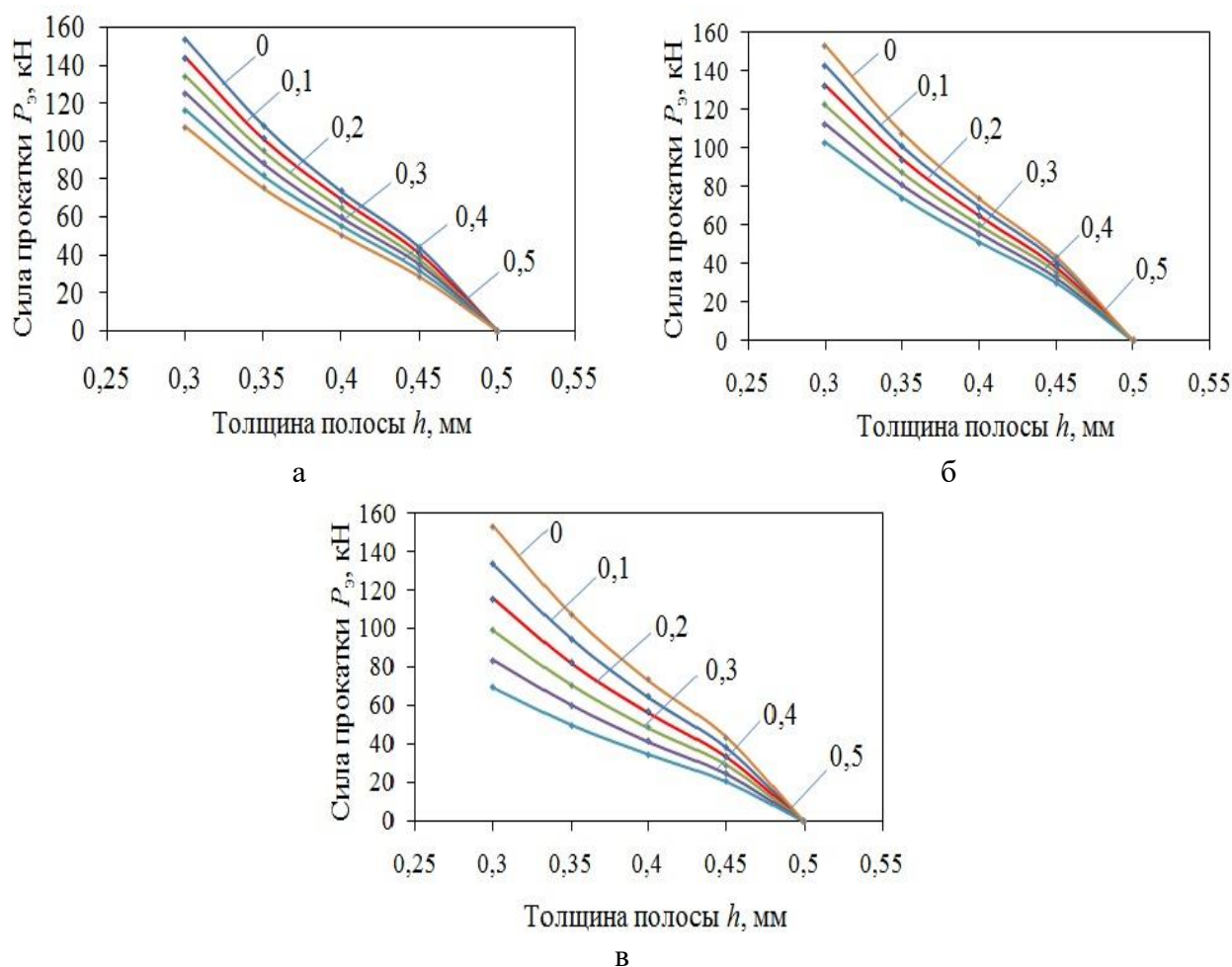


Рис. 4 Экспериментальные кривые пластичности при холодной прокатке с натяжением при прокатке полосы из стали 08кп толщиной 0,5 мм без смазки:

а – $q_0/\sigma_{T0}=0$; $q_1/\sigma_{T1}\neq 0$; б – $q_0/\sigma_{T0}\neq 0$; $q_1/\sigma_{T1}=0$; в – $q_0/\sigma_{T0}=q_1/\sigma_{T1}$; (цифры у кривых соответствуют значениям q/σ_T)

Из рис. 4 видно, что все экспериментальные зависимости $P_3=\varphi(h_1)$, независимо от уровня и соотношения относительных натяжений при холодной прокатке, выражаются однотипными плавными кривыми, что служит косвенным подтверждением удовлетворительной точности экспериментальных данных, использованных для их построения. Экспериментальные кривые пластичности отличаются между собой только количественно.

Высокая стабильность и одинаковый характер изменения экспериментальных кривых пластичности при холодной прокатке с натяжением свидетельствует о том, что само

натяжение при холодной прокатке является одним из основных стабилизирующих факторов процесса и подтверждает целесообразность его применения в качестве канала для эффективного воздействия на толщину полосы, а также на профиль и форму активной образующей рабочих валков в системах САРТ, САРТиН и САРПФ на полосовых станах холодной прокатки.

ВЫВОДЫ

1. С использованием специальной лабораторной установки впервые выполнено экспериментальное исследование влияния натяжения на силу прокатки $R\epsilon$ при холодной прокатке полосы толщиной 0,5 мм из стали 08кп без смазки с частными относительными обжатиями ϵ от 0 до 0,4 в диапазоне изменения уровней и соотношения переднего и заднего относительных натяжений q/σ от 0 до 0,5. По результатам выполненного исследования были построены экспериментальные зависимости $R\epsilon = f(\epsilon)$ и кривые пластичности $R\epsilon = f(h_1)$ при холодной прокатке с натяжением.

2. Установлено, что по сравнению с холодной прокаткой без натяжения при реализации процесса с двумя одинаковыми относительными натяжениями, равными 0,5 сила прокатки уменьшается на 50...53%. При прокатке с одним задним или с одним передним относительным натяжением, равным 0,5, зафиксировано практически одинаковое, но меньшее (примерно на 30...33%) уменьшение силы прокатки.

3. Экспериментальные кривые пластичности независимо от уровня и соотношения относительных натяжений при холодной прокатке имеют одинаковый плавный характер изменения и отличаются между собой только количественно. Это свидетельствует о том, что натяжение является одним из основных стабилизирующих факторов процесса холодной прокатки и подтверждает целесообразность его применения в качестве канала воздействия на толщину, профиль и форму полосы в соответствующих системах автоматического регулирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василев Я.Д. *Основы теории продольной холодной прокатки. Пластическая деформация металлов. Коллективная монография / Я.Д. Василев. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – С.107–125.*
2. Василев Я.Д. *Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки / Я.Д. Василев. – М.: Металлургия, 1995. – 368 с.*
3. Целиков А.И. *Теория продольной прокатки. Учебник для студентов вузов / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.*
4. *Перспективы развития производства холоднокатаного проката на мировом и российском рынках / О.В. Федонин, С.Я. Унру, М.В. Немкин и др. // Металлург. – 2011. – № 5. – С. 9–16.*
5. Тимошенко Э.В. *Синтез систем управления параметрами штабы при холодному прокатуванні / Э.В. Тимошенко, О.О. Самецкий – К.: НВК «КІА», 1999. – 246 с.*
6. Приходько И.Ю. *Средства компьютерного моделирования и системы управления процессами тонколистовой прокатки ИЧМ. Пластическая деформация металлов: Коллективная монография / И.Ю. Приходько. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – С. 142–149.*
7. Василев Я.Д. *Производство полосовой и листовой стали. Учебник для вузов. / Я.Д. Василев, М.М. Сафьян. – Киев: Вища школа, 1976. – 192 с.*
8. Василев Я. Д. *Теоретическое исследование влияния натяжения на энергетическую эффективность процесса холодной полосовой прокатки / Я. Д. Василев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 6. – С. 3–5.*
9. Василев Я.Д. *Моделирование влияния натяжения на мощность процесса холодной полосовой прокатки / Я.Д. Василев, Д.Н.Самокиш // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012 – № 12. – С 19–23.*
10. Василев Я.Д. *Разработка энергосберегающих режимов натяжений на непрерывных станах холодной прокатки / Я.Д. Василев, Д.Н.Самокиш // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013 – №2. – С. 34–38.*
11. Скорыходов В. Н. *Исследование влияния режимов натяжения на расход энергии при тонколистовой холодной прокатке / В. Н. Скорыходов, Ю. А. Мухин, К. В. Бахаев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – С. 33–37.*
12. *Экспериментальная проверка точности и работоспособности единой методики расчета, энергосиловых и температурно-скоростных параметров процесса холодной полосовой прокатки / Я.Д. Василев,*

Д.Н. Самокиш, А.В. Дементийенко, М.И. Завгородний // *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация»* – 2014. – № 2. – С. 65–73.

13. Единая методика расчета энергосиловых и температурно-скоростных параметров процесса холодной полосовой прокатки / Я.Д. Василев, Д.Н. Самокиш, А.В. Дементийенко, М.И. Завгородний // *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация»* – 2014. – № 1. – С. 50–58.

14. Василев Я. Д. Непрерывная прокатка тонких и особо тонких полос. Непрерывная прокатка: Коллект. Монография / Я.Д. Василев, А.В. Дементийенко // *Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – С. 137–293.*

REFERENCES

1. Vasilev Ja.D. *Osnovy teorii prodol'noj holodnoj prokatki. Plasticheskaja deformacija metallov. Kollektivnaja monografija / Ja.D. Vasilev. – Dnepropetrovsk: Akcent PP, 2014. – S.107–125.*

2. Vasilev Ja.D. *Inzhenernye modeli i algoritmy rascheta parametrov holodnoj prokatki / Ja.D. Vasilev. – M.: Metallurgija, 1995. – 368 s.*

3. Celikov A.I. *Teorija prodol'noj prokatki. Uchebnik dlja studentov vuzov / A.I. Celikov, G.S. Nikitin, S.E. Rokotjan. – M.: Metallurgija, 1980. – 320 s.*

4. *Perspektivy razvitiija proizvodstva holodnokatanogo prokata na mirovom i rossijskom rynkah. / O.V. Fedonin, S.Ja. Unru, M.V. Nemkin i dr. // Metallurg. – 2011. – № 5. – S. 9–16.*

5. Timoshenko Je.V. *Sintez sistem upravlinnja parametrami shtabi pri holodnomu prokatuvanni / Je.V. Timoshenko, O.O. Sameckij – K.: NVK «KIA», 1999. –246 s.*

6. Prihod'ko I.Ju. *Sredstva komp'juternogo modelirovanija i sistemy upravlenija processami tonko-listovoj prokatki IChM. Plasticheskaja deformacija metallov: Kollektivnaja monografija / I.Ju. Prihod'ko. – Dnepropetrovsk: Akcent PP, 2014. – S. 142–149.*

7. Vasilev Ja.D. *Proizvodstvo polosovoj i listovoj stali. Uchebnik dlja vuzov. / Ja.D. Vasilev, M.M. Saf'jan. – Kiev: Vishha shkola, 1976. – 192 s.*

8. Vasilev Ja. D. *Teoreticheskoe issledovanie vlijanija natjazhenija na jenergeticheskiju jeffektivnost' processa holodnoj polosovoj prokatki / Ja. D. Vasilev // Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija. – 2012. – № 6. – S. 3–5.*

9. Vasilev Ja.D. *Modelirovanie vlijanija natjazhenija na moshhnost' processa holodnoj polosovoj prokatki / Ja.D. Vasilev, D.N.Samokish // Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija. – 2012 – № 12. – S 19–23.*

10. Vasilev Ja.D. *Razrabotka jenergosberegajushhh rezhimov natjazhenij na nepreryvnyh stanah holodnoj prokatki / Ja.D. Vasilev, D.N.Samokish // Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'. – 2013 – №2. – S. 34–38.*

11. Skorohodov V. N. *Issledovanie vlijanija rezhimov natjazhenija na rashod jenerгии pri tonkolistovoj holodnoj prokatke / V. N. Skorohodov, Ju. A. Muhin, K. V. Bahaev // Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'. – 2002. – S. 33–37.*

12. *Jeksperimental'naja proverka tochnosti i rabotosposobnosti edinoj metodiki rascheta, jenergosilovyh i temperaturno-skorostnyh parametrov processa holodnoj polosovoj prokatki / Ja.D. Vasilev, D.N. Samokish, A.V. Dementienko, M.I. Zavgorodnij // Chernaja metallurgija: Bjul. in-ta «Chermetinformacija» – 2014. – № 2. – S. 65–73.*

13. *Edinaja metodika rascheta jenergosilovyh i temperaturno-skorostnyh parametrov processa holodnoj polosovoj prokatki/ Ja.D. Vasilev, D.N. Samokish, A.V. Dementienko, M.I. Zavgorodnij // Chernaja metallurgija: Bjul. in-ta «Chermetinformacija» – 2014. – № 1. – S. 50–58.*

14. *Vasilev Ja. D. Nepreryvnaja prokatka tonkih i osobo tonkih polos. Nepreryvnaja prokatka: Kollekt. Monografija / Ja.D. Vasilev, A.V. Dementienko // Dnipropetrovsk: RVA «Dnipro-VAL», 2002. – S. 137–293.*

Василев Я. Д. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ
Самокиш Д. Н. – ассист. каф. ОМД НМетАУ
Замогильный Р. А. – аспирант каф. ОМД НМетАУ
Железнов Д. В. – студент НМетАУ

НМетАУ – Национальная металлургическая Академия Украины, г.Днепр.

E-mail: roman.zamogilny@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 31.01.2017 г.