

УДК 621.771.01

Э.П. ГРИБКОВ, Е.Ю. ГАВРИЛЬЧЕНКО

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАСТРОЕК
ЛИСТОПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЫ**

Розглянута методика визначення параметрів процесу правки листів, відмінною рисою якої є облік вигину робочих роликів і його вплив на виправлення дефекту хвилястості. Методика заснована на спільному використанні інженерної та регресійної моделей, отриманих в результаті реалізації скінчено-елементної моделі правки хвилястості листів. Даний підхід дозволяє знизити час розрахунку параметрів листопрямильної машини. Отримано оптимальні значення коефіцієнта проникнення пластичної деформації, налаштувань машини, а також величини вигину робочого ролика для досягнення регламентованої стандартами хвилястості листів.

Ключові слова: толстолистовий металопрокат, правка, напружено-деформований стан, математичне моделювання, якість, листопрямильна машина.

Рассмотрена методика определения параметров процесса правки листов, особенностью которой является учёт изгиба рабочих роликов и его влияние на исправление дефекта волнистости. Методика основана на совместном использовании инженерной и регрессионной моделей, полученных в результате реализации конечно-элементной модели правки волнистости листов. Данный подход позволяет снизить время расчета настроек листопрямильной машины. Получены оптимальные значения коэффициента проникновения пластической деформации, настроек машины, а также величины изгиба рабочего ролика для достижения регламентируемой стандартами волнистости листов.

Ключевые слова: толстолистовой металлопрокат, правка, напряженно-деформированное состояние, математическое моделирование, качество, листопрямильная машина.

The paper considers the method of determining the parameters of the sheets leveling, a distinguishing feature of which is the inclusion of a working roll bending and its impact on the correction of the defect waviness. The method is based on the joint use of an engineering model levelling the curvature of sheets and descriptions of regression resulting from the implementation of the finite element model changes waviness. This approach reduces the calculation time settings leveler. Optimum values of the coefficient of plastic deformation penetration, leveler settings, as well as the value of the bending of the working roller to achieve the standards regulated waviness of the sheets were obtained. From the analysis of the obtained dependences it can be concluded that the band waviness decreases with increasing bending and overlapping of the rollers. The calculations show that with a large waviness of the order of 60 mm / m, a single curvature of the rollers achieves the required undulation of the edges ($A < 8$ mm / m) is not possible. The most significant factor here is the decrease in the parameter W/h to a level of 0.25, which is achieved, as a rule, by a third roller and is limited by the normalized coefficient of plastic deformation penetration. However, it is sufficient to bend a single roller in the majority of cases to ensure the quality normalized by the corrugation of the sheets, and for sheets 4 ... 14 mm thick with a width of 1000 ... 2000 mm, the amount of curvature required for straightening the edge curvature of the rollers does not exceed 2.0 mm.

Keywords: thick plate, leveling, stress-strain state, mathematical modeling, quality, leveler.

Введение. Листовой металопрокат является основной металлопродукцией, потребляемой промышленностью Украины и повышение его качества является актуальной задачей. На заключительном этапе производства лист подвергается правке на многороликовых листопрямильных машинах, параметры и настройки которых определяют его качество, в частности, планшетность. Тенденция совершенствования листопрямильных машин заключается в расширении их технологических возможностей за счет изгиба рабочих роликов, что позволяет устранить дефекты не только в продольном, но и в поперечном направлении. В то же время технологические режимы правки для такого типа машин носят эмпирический характер и требуют развития соответствующих систем автоматизированного проектирования.

Анализ публикаций. Правка листов является одним из важных этапов получения качественной металлопродукции. Повышение требований к геометрическим характеристикам листопрямильной продукции определяет развитие листопрямильных машин с точки зрения повышения эффективности процесса и расширения их возможностей для реализации правки не только продольной кривизны, но и волнистости, что возможно при использовании изгиба рабочих роликов [1]. Указанное делает актуальным развитие математических моделей процесса правки для определения необходимых настроек листопрямильной машины.

Основная задача математического описания процесса правки листового металопроката заключается в определении энергосиловых параметров, необходимых для проектирования оборудования и в определении остаточной кривизны листа, необходимой для определения технологических настроек машины. В качестве методов моделирования используются численные и конечно-элементные модели. Численные модели обладают высоким быстродействием, что позволяет их использовать в автоматической системе управления [2–3]. Конечно-элементные модели требуют больших затрат машинного времени на расчет, но позволяют получать более точные результаты с широким учетом влияния факторов на процесс [4–5]. Во всех работах, посвященных моделированию правки листов отмечается преимущественное влияние свойств материала на протекание процесса. Существующие модели процесса правки листового проката не учитывают влияние изгиба рабочих роликов на распределение деформации по ширине листа и, как следствие, исправление дефекта волнистости. Это делает актуальным дальнейшее развитие математических моделей с представлением деформируемого металла в трехмерном пространстве и последующим анализом влияния технологических настроек рабочих роликов на плоскостность выправляемого проката.

Цель и постановка задачи. Целью работы является совершенствование математической модели процесса правки листового металопроката и

создание на её основе системы автоматизированного расчета технологических настроек листопрямительной машины с дифференцированным приложением силы правки по ширине проката.

Автоматизированное проектирование технологических настроек листопрямительной машины. Математическая модель процесса правки, а также ее программная реализация в своей совокупности позволяет определять энергосиловые параметры процесса правки исходя из известных параметров выправляемого металла и листопрямительной машины [6].

Следует отметить, что разработанный алгоритм математической модели позволяет определять требуемую для исправления продольной кривизны технологическую настройку правильной машины, что сводится к определению настроечных координат каждого из подвижных роликов в зависимости от известных параметров выправляемого металла, геометрических параметров листопрямительной машины, а также допускаемого значения остаточной кривизны металла после правки. При этом особенностью данной модели является возможность применения такой настройки роликов листопрямительной машины, при которой исправляется дефект, связанный с разным удлинением волокон по ширине листа.

Изучая опыт эксплуатации оборудования, для облегчения задачи металла в правильную машину первый по ходу металла ролик – верхний целесообразно устанавливать на толщину металла, а значение прогиба металла первыми роликами на входе в машину соответствует:

$$f_3 = \frac{\sigma_s t^3}{KEh}, \quad (1)$$

где σ_s – предел прочности материала полосы, подвергаемой правке, МПа;

t – шаг роликов правильной машины, мм;

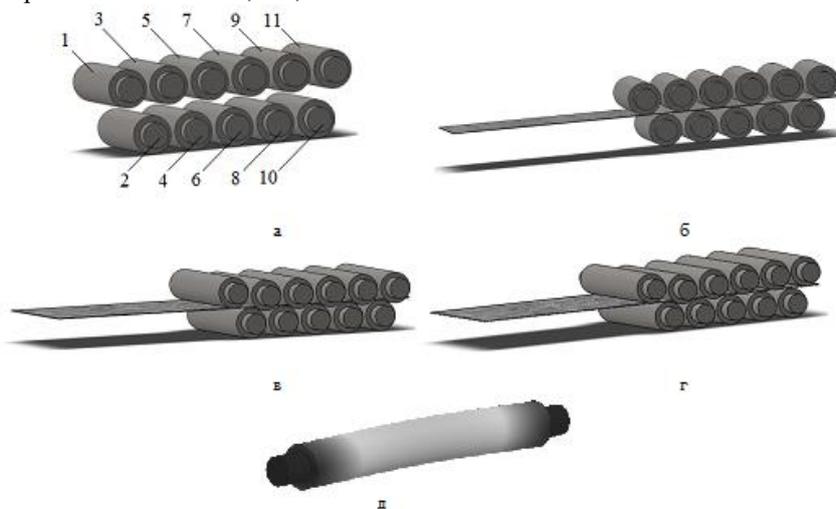


Рис. 1 – Расчётная схема к алгоритму автоматизированного проектирования технологической настройки многороликовой листопрямительной машины: а – все нижние ролики лежат в одной плоскости на уровне правки; б – верхние ролики на расстоянии от нижних, равном толщине выправляемого металла; в – верхние ролики, начиная со 2-го, опускаются на величину, равную расчетному прогибу f_3 ; г – верхние ролики, начиная с № 5, начинают приподнимать на величину, равную точности позиционирования осей роликов имеющимся нажимным механизмом; д – обеспечивается изгиб валка ΔW_i

E – модуль упругости, МПа;

h – толщина полосы, подвергаемой правке на листопрямительной машине, мм;

K – коэффициент проникновения пластической деформации.

В качестве исходных данных были использованы следующие: диаметр роликов d листопрямительной машины; шаг роликов t листопрямительной машины; количество n роликов, а также их особенность расположения; толщина листа h , физико-механические свойства материала листа, его предел текучести и коэффициенты, описывающие кривую упрочнения; исходная кривизна листа; заданный коэффициент проникновения пластической деформации; максимально допустимая кривизна листа после правки.

Под особенностями расположения правильных роликов подразумевается порядок их расположения в верхней и нижней кассетах (верхний или нижний ролики первый по ходу движения металла), возможность регулирования положения входного и выходного роликов, параллельная, наклонная или индивидуальная настройка остальных роликов и расположение регулируемых роликов – в верхней или нижней кассетах.

Основываясь на указанных предпосылках, полученных из опыта эксплуатации и, используя вышеприведенные исходные данные, был разработан следующий алгоритм автоматизированного проектирования технологической настройки многороликовой листопрямительной машины, приведенный для конструкции с возможностью правки листов с волнистостью:

На первом этапе для всего цикла проектирования все нижние ролики лежат в одной плоскости на уровне правки (рис. 1, а), а верхние ролики устанавливаются на расстоянии от нижних, равном толщине выправляемого металла (см. рис. 1, б).

На втором этапе первый ролик остается без изменений, а последующие верхние ролики, начиная со 2-го, опускаются на величину, равную расчетному прогибу f_3 (см. рис. 1, в).

Третий этап заключается в моделировании процесса правки для полученных координат правильных роликов. Происходит проверка, которая заключается в следующем: когда кривизна металла на выходе из машины меньше или равна допустимой, проектирование завершается, настройка считается приемлемой. Если же кривизна полосы на выходе из листопрямительной машины превышает допустимое значение, то ролики № 1 и 3 остаются на месте, а верхние ролики, начиная с № 5, начинают

приподнимать на величину, равную точности позиционирования осей роликов имеющимся нажимным механизмом (см. рис. 1, г). Для полученных координат снова производится повтор, начиная с третьего этапа.

После того, как остаточная продольная кривизна χ_1 листа войдет в допустимый интервал кривизны, проверяется показатель формы листа Φ_1 и в случае необходимости проводят изгиб валка ΔW_i (см. рис. 1, д).

Укрупненная блок-схема данного алгоритма решения показана на рис. 2.

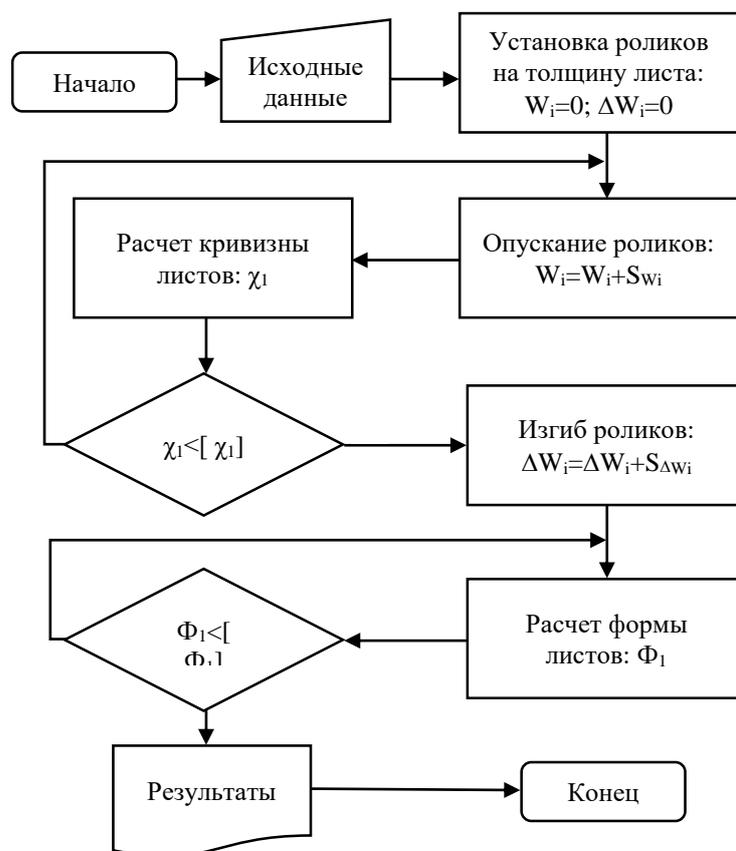


Рис. 2 – Укрупненная блок-схема алгоритма автоматизированного расчета технологической настройки многороликовой листопрямительной машины

Для проверки адекватности разработанного алгоритма автоматизированного расчета технологической настройки многороликовой листопрямительной машины был проведен ряд расчетов для различного типоразмера листов из различных материалов. На основе расчетных распределений остаточной кривизны листов для диапазона толщин от 4 мм до 16 мм установлено что при увеличении угла наклона верхней траверсы остаточная кривизна уменьшается до своего минимального значения, близкого к нулю, а затем наблюдается ее бессистемное хаотичное изменение с резким увеличением. Из представленных распределений видно, что с увеличением толщины выправляемого металла для достижения заданной остаточной

кривизны листа угол наклона верхней траверсы увеличивается. Анализ зависимостей показывает наличие единственного экстремума результирующей кривизны листа и подтверждает правомерность используемого алгоритма и дальнейшего его использования для расчетов.

На основе описанного алгоритма были произведены исследования по проектированию технологических настроек для различных геометрических параметров выправляемого листа и анализ полученных настроек в зависимости от исходных параметров процесса. Пример полученных расчетных распределений показан на рис. 3.

Из проведенных расчетов для различных типоразмеров и анализа графика, видно, что

оптимальное значение коэффициента проникновения упругой деформации лежит в диапазоне от 4...4,5, причем меньшее значение относится к меньшей толщине проката.

Применение программной реализации описанной математической модели с точки зрения многокритериального поиска экстремумов для нахождения наиболее адекватных параметров технологических процессов для заданных исходных характеристик механического оборудования и сортамента выправляемого металлопроката позволяет выбрать такой набор технологических настроек, при котором, с одной стороны, достигается

минимальный прогиб листа и, соответственно, минимальная величина силы и момента правки, что является актуальным для решения задач расширения сортамента обрабатываемого металлопроката на существующих листопрямильных машинах с ограниченными технологическими возможностями, а с другой стороны, нахождения настроек, обеспечивающих наилучшее качество готовой продукции на современных листопрямильных машинах, способных реализовать индивидуальную настройку правильных роликов, включая учет показателей плоскостности листа.

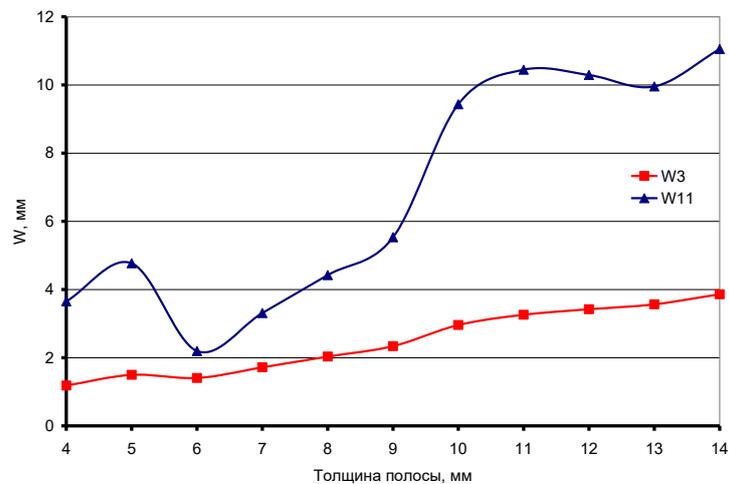


Рис. 3 – Зависимость положения третьего W3 и одиннадцатого W11 роликов от толщины полосы

На рисунке 4 представлены результаты расчета применительно к процессу правки полосы толщиной от 4 до 14 мм при фиксированном перекрытии роликов на величину 3,5 мм, то есть при различных отношениях W/h (от 0,875 до 0,214) и одинаковой величине волнистости равной $A=60$ мм/м. Из анализа данных зависимостей можно сделать вывод об уменьшении волнистости полосы при увеличении изгиба и перекрытия роликов. При этом расчеты показывают, что при данной волнистости

однократным изгибом роликов достичь требуемую волнистость кромок ($A < 8$ мм/м) не представляется возможным. Наиболее значимым фактором при этом является уменьшение параметра W/h до уровня 0,25, который достигается, как правило, третьим роликом и ограничивается нормируемым коэффициентом проникновения пластической деформации. При этом, как показывают расчеты требуемый уровень планшестности ($\Phi=0,1...1,0$) можно достичь изгибом рабочих роликов на уровне 1,5...2,0 мм.

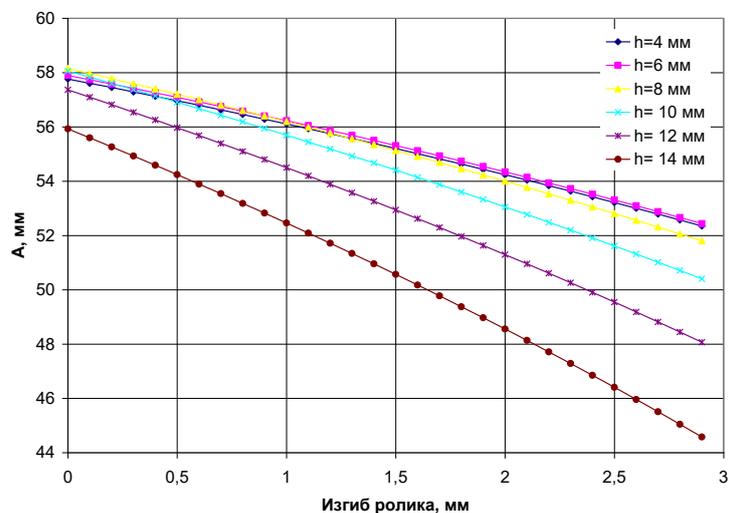


Рис. 4 – Зависимость амплитуды краевой волнистости полосы от изгиба рабочих роликов

Выводы. На основе исследования влияния установки и изгиба рабочих роликов листопрямляющей машины на качество правки разработан комплекс математических моделей процесса правки листов с дифференцированным приложением силы по ширине проката, включающий аналитическую, конечно-элементную и регрессионную модели. В результате реализации которых установлено, что изгиб рабочего ролика влияет на исправление дефекта волнистости листа. В частности, для обеспечения нормируемого стандартами качества по волнистости листов достаточно в большинстве случаев изгиба одного ролика, причем для листов толщиной 4...14 мм при ширине 1000...2000 мм – величина требуемого для правки краевой волнистости изгиба роликов не превышает 2,0 мм.

Список литературы

1. Шинкин В. Н. Расчет технологических параметров правки стального листа на одиннадцатиролковой листопрямляющей машине линии поперечной резки фирмы Fagor Arrasate / В. Н. Шинкин // Производство проката. – 2014. – № 8. – С. 26–34.
2. Слоним А. З. Правка листового и сортового проката / А. З. Слоним, А. Л. Сонин. – М.: Металлургия, 1981. – 232 с.
3. Недорезов И. В. Роликовые правильные машины АО «Уралмаш» и пути их совершенствования / И. В. Недорезов, Б. Я. Орлов, А. Х. Винокурский // Труды первого Конгресса прокатчиков. Магнитогорск, 23-27 октября, 1995. – М., 1996. – С. 38–42.
4. Park K. Development of a Finite Element Analysis Program for Roller Leveling and Application for Removing Blanking Bow Defects of Thin Steel Sheet / K. Park, S. Hwang // ISIJ International. – Vol. 42 (2002), No. 9. – pp. 990–999. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.42.990>.
5. Cui L. Analysis of Leveling Strategy for a plate Mill / L. Cui, X. Hu, X. Liu // Advanced Materials Research. – Vol. 145 (2011). – pp. 424–428. <http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.145.424>.

pp. 424–428. <http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.145.424>.

6. Математическая модель технологических настроек ЛПМ ТЛС 2850 Ашинского металлургического завода для горячей и холодной правки листов / В. А. Федоринов, А. В. Барабаш, Е. Ю. Гаврильченко, Э. П. Грибков // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 1 (38). – С. 48–53.

Bibliography (transliterated)

1. Shinkin V. N. Calculation of the technological parameters of straightening the steel sheet at 11-roll leveler transverse cutting line firm [Расчет технологических параметров правки стал'ного листа на одиннадцатиролковой листопрямляющей машине линии поперечной резки фирмы Fagor Arrasate] / V. N. Shinkin // Proizvodstvo prokata. – 2014. – No 8. – pp. 26–34.
2. Slonim A. Z. Leveling sheet and long products [Правка листового и сортового проката] / A. Z. Slonim, A. L. Sonin. – Moscow : Metallurgija, 1981. – 232 p.
3. Nedorezov I. V. Roller straightening machines JSC "Uralmash" and ways to improve them [Роликовые правильные машины АО «Уралмаш» и пути их совершенствования] / I. V. Nedorezov, B. Ja. Orlov, A. H. Vinokurskij // Trudy pervogo Kongressa prokatchikov. Magnitogorsk, 23–27 oktjabrja, 1995. – Moscow : 1996. – pp. 38–42.
4. Park K. Development of a Finite Element Analysis Program for Roller Leveling and Application for Removing Blanking Bow Defects of Thin Steel Sheet / K. Park, S. Hwang // ISIJ International. – Vol. 42 (2002), No. 9. – pp. 990–999. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.42.990>.
5. Cui L. Analysis of Leveling Strategy for a plate Mill / L. Cui, X. Hu, X. Liu // Advanced Materials Research. – Vol. 145 (2011). – pp. 424–428. <http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.145.424>.
6. Mathematical model of technological settings of the LPM TLS 2850 Ashinsky Metallurgical Plant for hot and cold edging sheets [Математическая модель технологических настроек ЛПМ ТЛС 2850 Ашинского металлургического завода для горячей и холодной правки листов] / V. A. Fedorinov, A. V. Barabash, E. Ju. Gavril'chenko, Je. P. Gribkov // Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2014. – No 1(38). – pp. 48–53.

Поступила (received) 15.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Автоматизоване проектування технологічних налаштувань листопрямляючої машини / Е. П. Грибков, Є.Ю. Гаврильченко // Вісник НТУ «ХП». Серія:Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХП», 2017. – №37(1259). – С. 11–16 – Библиогр.: 6 назв.– ISSN 2519-2671

Автоматизированное проектирование технологических настроек листопрямляющей машины / Э. П. Грибков, Е. Ю. Гаврильченко // Вісник НТУ «ХП». Серія:Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХП», 2017. – №37(1259). – С. 11–16 – Библиогр.: 6 назв.– ISSN 2519-2671

Aided-design of the leveler technological settings / E. P. Gribkov, E. Yu. Gavrilchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 37(1259). – P. 11–16. – Bibl.: 6. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Грибков Едуард Петрович – доктор технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, доцент кафедри автоматизованих металургійних машин і обладнання; тел.: (0626) 41-46-81; e-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Грибков Эдуард Петрович – доктор технических наук, доцент, Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, доцент кафедры автоматизированных металлургических машин и оборудования; тел.: (0626) 41-46-81; e-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Gribkov Eduard Petrovich – Doctor of Technical Sciences, Docent, Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Associate Professor at the Department of Automated Metal Forming Process and Machinery; tel.: (0626) 41-46-81; e-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Гаврильченко Євген Юрійович – начальник бюро агрегатних ліній дивізіону прокатного обладнання ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», м. Краматорськ; тел.: (06264) 7-82-39; e-mail: bhps@nkmz.donetsk.ua.

Гаврильченко Євгеній Юрьевич – начальник бюро агрегатних ліній дивізіона прокатного обладнання ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», г. Краматорск; тел.: (06264) 7-82-39; e-mail: bhps@nkmz.donetsk.ua

Gavril'chenko Evgeniy Yurevich – Chief of Bureau of aggregate division lines rolling equipment of PJSC "Novokramatorsky Mashinostroitelny Zavod", Kramatorsk; тел.: (06264) 7-82-39; e-mail: bhps@nkmz.donetsk.ua