УДК 621.771.06

**Сатонин А.В., Коренко М.Г., Стриченко С.М.,
Староста Н.В., Таранин Д.Ю.**

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ПОЛОСОВЫХ ПРОФИЛЕЙ В ЧИСТОВЫХ РАБОЧИХ КЛЕТЯХ МЕЛКОСОРТНЫХ СТАНОВ

**Satonin A.V., Korenko M.G., Strichenko S.M.,
Starosta N.V., Taranin D.Yu.**

# ANALYSIS OF THE IMPACT OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF HOT ROLLING OF STRIP PROFILES IN THE FINISHING STANDS OF SMALL-SECTION ROLLING MILLS

*Представлены результаты проведенного анализа влияния условий реализации процесса горячей прокатки полосовых профилей различного типоразмера и разработаны практические рекомендации по совершенствованию конструктивных параметров механического оборудования чистовых рабочих клетей сортовых прокатных станов. Предложен обобщенный критерий оптимальности интенсивности изменения степени кинематической асимметрии.*
***Ключевые слова:*** *сортамент, модуль жесткости, очаг деформации, экспериментальные исследования, геометрические характеристики, математическая модель.*

## Введение

Промышленное производство горячекатаных полосовыхх профилей является одним из наиболее динамично развивающихся направлений в черной и цветной металлургии.

Одним из направлений по повышению технико-экономических показателей промышленного производства горячекатаных полосовых профилей является расширение их сортамента, повышение точности прокатки при обеспечении экономии материальных ресурсов. Отмеченное диктует необходимость повышения степени научной обоснованности принимаемых технических решений на основе проектирования соответствующих технологий и оборудования, а также разработки и внедрения практических рекомендаций, направленных на их совершенствование.

Процессы горячей прокатки полосовых профилей в чистовых рабочих клетях сортовых прокатных станов, изучены достаточно полно, как с

точки зрения инженерных, так и численных методов расчета [1-5]. Однако, многообразие используемых в этом случае возможных технологических схем делает актуальным проведение дальнейших теоретических и экспериментальных исследований, направленных на совершенствование действующего и создание нового оборудования сортовых прокатных станов.

**Цель**

Цель работы – выполнить анализ влияния условий реализации процесса горячей прокатки полосовых профилей различного типоразмера и разработать научно обоснованные практические рекомендации по совершенствованию конструктивных параметров механического оборудования чистовых рабочих клетей мелкосортных станов, направленные на повышение технико-экономических показателей процесса промышленного производства полосовых профилей.

**Методика исследования**

Количественная и качественная оценка влияния исходных технологических и конструктивных параметров на основные технико-экономические показатели процесса промышленного технологического производства горячекатаных полосовых профилей выполнена на основе обобщения результатов численной реализации математических моделей, достаточная степень достоверности которых подтверждена экспериментально. В качестве объекта данного анализа использованы технологические режимы работы и конструкции рабочих клетей чистовой группы мелкосортного стана 250 (рис. 1).

Из условий реализации процесса горячей прокатки полосовых профилей в качестве исследуемых технологических и конструктивных параметров рассмотрены исходная толщина заготовки и величина ее относительного обжатия, химический состав и температура деформируемого металла, условия внешнего контактного трения и скорость прокатки, степень кинематической асимметрии процесса, а также радиусы рабочих валков, величина их радиальных биений и обобщенное значение модуля жесткости рабочей клети.

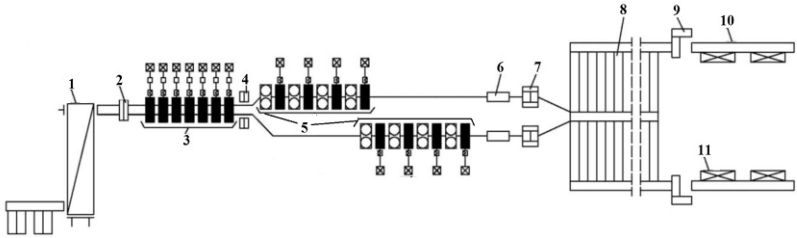


Рис. 1. Схема расположения основного оборудования мелкосортного стана 250: 1 – нагревательная печь; 2 – аварийные ножницы; 3 – горизонтальные рабочие клети черновой группы; 4 – аварийные ножницы; 5 – вертикальные и горизонтальные рабочие клети чистовых групп; 6 – водоохлаждающее устройство для термоупрочнения проката; 7 – летучие ножницы; 8 – реечный холодильник; 9 – ножницы холодной резки; 10 – собирающий рольганг; 11 – весы с карманами

**Результаты исследований**

Исходя из результатов анализа полученных расчетных распределений (рис. 2 - 4) по отношению к градиентной оценке влияния указанных выше факторов, необходимо отметить следующее:

– с увеличением относительного обжатия ε приведенные к единице ширины B значения силы P/B и суммарного момента прокатки M/B интенсивно возрастают во всем диапазоне и независимо от влияния других факторов (рис. 2 - 4), что обусловлено увеличением общей протяженности очага деформации, подпирающего воздействия сил внешнего трения и сопротивления деформации прокатываемого металла;

– увеличение общей протяженности очага деформации и подпирающего воздействия сил внешнего трения обуславливает повышение энергосиловых параметров и с увеличением радиусов рабочих валков (рис. 2 в, г);

− повышение уровней механических свойств приводит к увеличению приведенных значений P/B и M/B с уменьшением температуры прокатки t (рис. 3, а, б), а также при деформировании заготовок из более прочных материалов (рис. 3, в, г);

− с увеличением подпирающего воздействия сил внешнего трения связано повышение приведенных значений силы P/B и особенно момента M/B при увеличении соответствующего коэффициента $\mu_0$ (рис. 4, а, б);

− снижение приведенного показателя P/B за счет уменьшения эффекта подпирающего воздействия сил внешнего трения имеет место при создании кинематической асимметрии и увеличении количественной оценки ее показателя $K_v$ (рис. 4, в), в то же время весьма существенным в этом случае является перераспределение моментов прокатки на ведущем и ведомом рабочих валках (рис. 4, г).

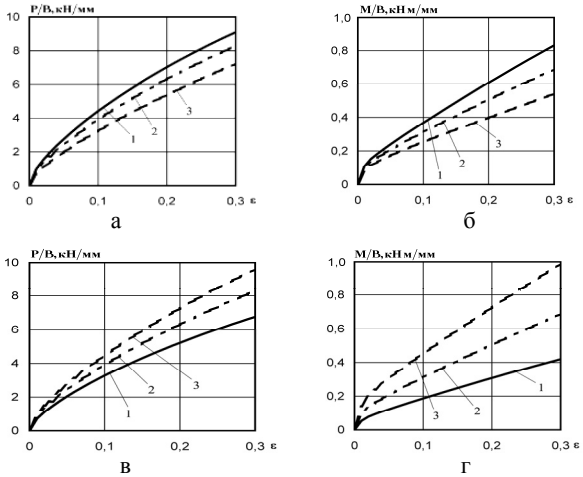


Рис. 2. Расчетные распределения приведенных к единице ширины В значений силы Р/В (а, в) и суммарного момента М/В (б, г) процесса горячей прокатки полосовых профилей из стали 10 в зависимости от величины относительного обжатия **ε** при различных значениях исходной толщины $h_0$ (а, б) и радиусов рабочих валков R (в, г): 1– $h_0$ = 6 мм; 2 – $h_0$ = 4 мм; 3 – $h_0$ = 2 мм; 1 – $R$ = 100 мм; 2 – $R$ = 150 мм; 3 – $R$ = 200 мм

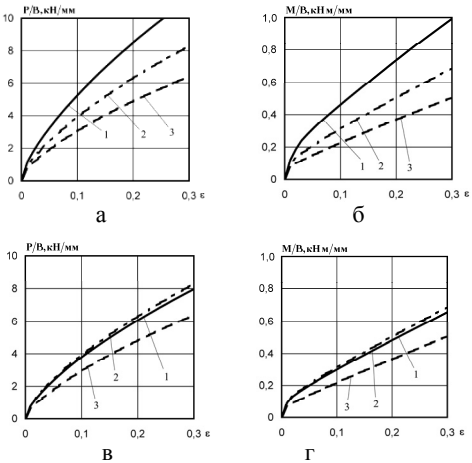


Рис. 3. Расчетные распределения приведенных к единице ширины В значений силы Р/В (а, в) и суммарного момента М/В (б, г) процесса горячей прокатки полосовых профилей в зависимости от величины относительного обжатия ε, температур t (а, б) и их материалов (в, г): 1– $t$ = 800 $^{o}$C; 2 – $t$ = 900 $^{o}$C; 3 – $t$ = 1000 $^{o}$C; 1 – сталь 40 ХН; 2 – сталь 10; 3 – сталь 65Г

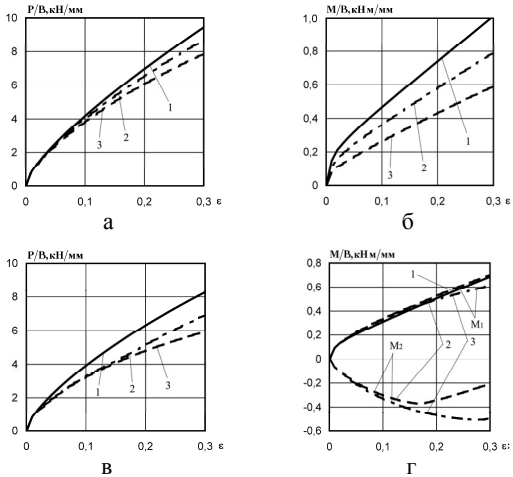


Рис. 4. Расчетные распределения приведенных к единице ширины В значений силы Р/В (а, в) и суммарного момента М/В (б, г) процесса горячей прокатки полосовых профилей в зависимости от показателей коэффициента трения $\mu_0$, (а, б) и степени кинематической асимметрии $K_v$ (в, г):
1 – $\mu_0$ =0,4; 2 – $\mu_0$ = 0,3; 3 – $\mu_0$ = 0,2;  1– $K_v$ = 1,0; 2 – $K_v$ = 1,2; 3– $K_v$ = 1,4

С точки зрения количественной оценки указанного выше влияния показателя степени кинематической асимметрии $K_v$ процесса горячей прокатки полосовых профилей следует отметить, что с увеличением геометрического показателя $L/h_{cp}$, то есть при увеличении относительного обжатия и радиусов рабочих валков, а также с увеличением коэффициента пластического трения интенсивность снижения силы прокатки возрастает. Такая же картина наблюдается и в случае увеличения исходной толщины прокатываемой заготовки (рис. 5), что свидетельствует о целесообразности создания кинематической асимметрии только в последних рабочих клетях чистовой группы сортопрокатных станов. По аналогии с прокаткой широких полос [6–8] использование данного технического решения является эффективным с точки зрения обеспечения постоянства силы прокатки, а следовательно, и конечной толщины независимо от приращений исходной толщины и температуры.

Поэтому еще одним вопросом, касающимся совершенствования технологических режимов процесса горячей прокатки полосовых профилей, является выбор рационального распределения показателя степени кинематической асимметрии $K_v$ по длине прокатываемой заготовки, обеспечивающего, исходя из условия постоянства силы прокатки $P$, компенсацию низкочастотной составляющей исходной толщины $h_0$ и температуры $t$.

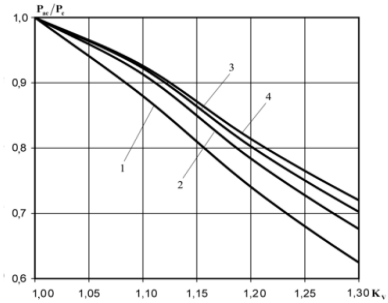


Рис. 5. Расчетные распределения соотношения силы при асимметричной $P_{ac}$ и симметричной $P_c$ горячей прокатке полосовых профилей в зависимости от показателя $K_v$ при различных значениях исходной толщины $h_0$: Сталь 10; $R$ = 150 мм; $\varepsilon$ = 0,3; $t$ = 900°С; 1– $h_0$ = 2 мм; 2 – $h_0$ = 3 мм; 3 – $h_0$ = 4 мм; 4 – $h_0$ = 5 мм

Решение данной задачи осуществлено на основе метода целенаправленного перебора вариантов по следующей t-ой итерационной схеме, рассматриваемой применительно к каждому j-ому поперечному сечению:

$$K_{vj(t+1)} = K_{vjt} + A_{Kv} sign\left\{P_{jt} - [P]\right\}, \qquad (1)$$

где $A_{Kv}$ – шаг изменения показателя степени кинематической асимметрии процесса горячей прокатки, принятый равным 0,001;

$P_{jt}$ – расчетное значение силы прокатки в данном $j$-ом поперечном сечении, учитывающее соответствующие значения исходной толщины $h_{0j}$, температуры $t_j$ и показателя степени кинематической асимметрии $K_{vjt}$;

$[P]$ – заданное значение силы прокатки, определяемое расчетным путем или экспериментально при количественных оценках всех исходных технологических параметров, соответствующих переднему концу прокатываемой заготовки ($j$ = 1);

$sign\left\{P_{jt} - [P]\right\}$ – функция знака, соответствующая:

$$sign\left\{ P_{jt} - [P]\right\} = \begin{cases} 1 \text{ ïðè } P_{jt} > [P]; \\ 0 \text{ ïðè } P_{jt} < [P]. \end{cases}$$

В качестве примера результатов численной реализации решения (1) на рис. 6 представлены расчетные распределения показателя степени кинематической асимметрии $K_v$, обеспечивающие постоянство приведенного зна-

чения силы прокатки Р/В независимо от дифференцированных и совместных приращений исходной толщины $h_0$ и температуры $t$.

Анализ представленных результатов свидетельствует о том, что для компенсации стохастического изменения только исходной толщины в диапазоне $h_0$ = 3÷3,6 мм изменение степени кинематической асимметрии должно соответствовать $K_v$ = 1-1,32, а при аналогичном изменении только температуры в диапазоне $t$ = 900-840°С – изменение данного показателя должно соответствовать $K_v$ = 1-1,16. В случае же совместного изменения и исходной толщины $h_0$, и температуры в указанных диапазонах требуемая для обеспечения постоянства силы прокатки $P$, а следовательно, и конечной толщины $h_1$ степень изменения кинематической асимметрии процесса горячей прокатки полосовых профилей соответствует $K_v$ = 1÷1,5, что свидетельствует о достаточно широких дополнительных возможностях рассмотренного технического решения.

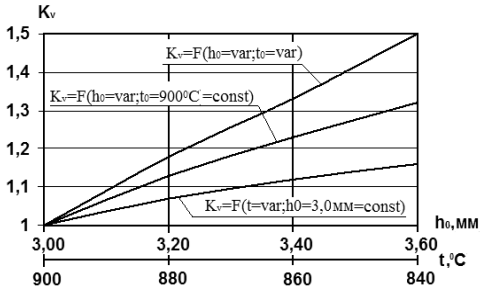


Рис. 6. Расчетные распределения степени кинематической асимметрии $K_v$, при обеспечении постоянства приведенного значения силы процесса горячей прокатки полосовых профилей Р/В

В самом общем случае увеличение радиусов рабочих валков R приводит к увеличению и силы $P$, и момента $M$ прокатки (рис. 2, в, г). Наряду с повышением уровня силы прокатки имеет место и увеличение модуля жесткости заготовки при ее пластическом формоизменении, определяемого как $G_{ïë} = \partial P / \partial h_1 \approx \Delta P / \Delta h_1$. В частности, как показали результаты численной реализации полученной математической модели при увеличении радиуса рабочих валков на 50 мм и прочих равных условиях величина модуля жесткости $G_{ïë}$ возрастает на 15-30 %.

Одновременно с этим, увеличение радиусов рабочих валков $R$ обуславливает повышение несущей способности и жесткости валкового узла, а, следовательно, и обобщенного значения всей рабочей клети $G_{êë}$. Так, например, увеличение диаметра рабочих валков чистовой клети мелко-

сортного стана горячей прокатки 250 с 270 мм (рис. 1) до рекомендуемых 325 мм позволит, как показали результаты расчетов, выполненные с использованием конечно-элементного пакета COSMOSWorks (рис. 7), повысить несущую способность валкового узла по напряжениям в 1,6-1,8 раза при одновременном увеличении его модуля жесткости в 2-2,2 раза. Последнее при сохранении конструкции узла станин, а также других узлов и механизмов силовой линии рабочей клети способствует повышению модуля жесткости всей рабочей клети на 30-40%, что полностью нивелирует повышение модуля жесткости заготовки $G_{i\ddot{e}}$ на улучшение условий захвата, а с учетом повышения несущей способности на возможность существенной интенсификации технологических режимов обжатий.

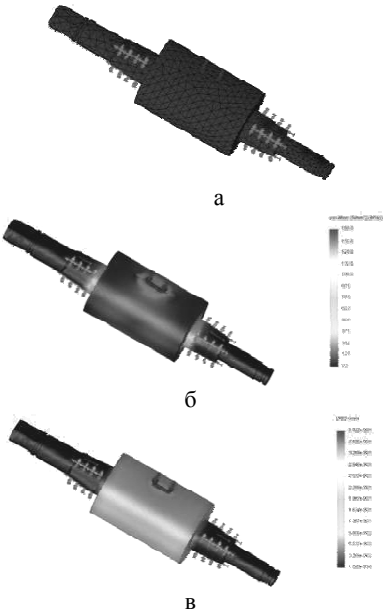


Рис. 7. Расчетная схема (а), распределения напряжений (б) и упругих деформаций (в) рабочих валков последних горизонтальных чистовых клетей мелкосортного стана горячей прокатки 250, полученные с использованием конечно-элементного пакета COSMOSWorks

**Выводы**

На основе результатов анализа влияния исходных технологических и конструктивных параметров, выполненного применительно к чистовым рабочим клетям мелкосортных станов горячей прокатки, получены количественные и качественные описания механизмов влияния геомет-

рических параметров и материалов исходных заготовок, радиусов рабочих валков, температур прокатки, условий внешнего контактного трения и степени кинематической асимметрии.

Предложен обобщенный критерий оптимальности, установлено, что с учетом реального диапазона изменения исходных толщин и температур, интенсивность изменения степени кинематической асимметрии должна соответствовать 1-1,5.

На основе анализа влияния основных конструктивных параметров показана целесообразность увеличения диаметров рабочих валков последних чистовых клетей мелкосортного стана 250 с 270 мм до 325 мм, установлено, что с точки зрения повышения точности результирующих геометрических характеристик горячекатаных полосовых профилей наиболее существенным влияние приведенного значения модуля жесткости является в диапазоне 0-4 кН/мм$^2$.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Василев Я. Д. Теорія поздовжньої прокатки : підручник / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. – Донецьк : УНІТЕХ, 2009. – 488 с.
2. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.
3. Ефимов В. Н. Сопротивление деформации в процессах прокатки / В. Н. Ефимов, М. Я. Бровман. – М. : Металлургия, 1996. – 253 с.
4. Андреюк Л. В. Аналитические зависимости сопротивления деформации металла от температуры и степени деформации / Л. В. Андреюк, Г. Г. Тюленев // Сталь. – 1972. – № 9. – С. 545–547.
5. Коновалов Ю. В. Справочник прокатчика. Справочное издание в 2-х книгах. Книга 1. Производство горячекатаных листов и полос / Ю. В. Коновалов. – М. : Теплотехник, 2008. – 640 с.
6. Освоение прокатки толстых листов со скоростной асимметрией на стане 3600 / В. С. Горелик, А. А. Будаква, П. С. Гринчук [и др.]. // Сталь. – 1984. – № 12. – С. 31–33.
7. Освоение технологии асимметричной горячей прокатки на НШС 2000 ЧерМК / А. Ф. Пименов, Ю. В. Липухин, А. Н. Трайно [и др.]. // Сталь. – 1988. – № 6. – С. 37–42.
8. Несимметричная горячая прокатка на широкополосном стане / А. Г Свичинский, Е. В. Бинкевич, В. Л. Мазур, А. К. Голубченко // Сталь. – 1992. – № 11. – С. 41–44.

**REFERENCES**

1. Vasilev Ja.D. Teorija pozdovzhn'oї prokatki : pidruchnik / Ja.D. Vasilev, O.A. Minaєv. – Donetsk : UNITEH, 2009. – 488 p.
2. Poluhin P.I. Soprotivlenie plasticheskoj deformacii metallov i splavov: spravochnik / P.I. Poluhin, G.Ja. Gun, A.M. Galkin. – Moscow: Metallurgija, 1983. – 352 p.

3. Efimov V.N. Soprotivlenie deformacii v processah prokatki / V.N. Efimov, M.Ja. Brovman. – Moscow: Metallurgija, 1996. – 253 p.
4. Andrejuk L.V. Analiticheskie zavisimosti soprotivlenija deformacii me-talla ot temperatury i stepeni deformacii / L.V. Andrejuk, G.G. Tjulenev // Stal. – 1972. – No 9. – pp. 545–547.
5. Konovalov Ju.V. Spravochnik prokatchika. Spravochnoe izdanie. Kniga 1. Proizvodstvo gorjachekatanyh listov i polos / Ju.V. Konovalov. – Moscow: Teplotehnik, 2008. – 640 p.
6. Osvoenie prokatki tolstyh listov so skorostnoj asimmetriej na stane 3600 / V.S. Gorelik, A.A. Budakva, P.S. Grinchuk [etc.]. // Stal.– 1984.– No 12.– pp. 31–33.
7. Osvoenie tehnologii asimmetrichnoj gorjachej prokatki na NShS 2000 CherMK / A.F. Pimenov, Ju.V. Lipuhin, A.N. Trajno [etc.] // Stal. – 1988. – No 6. – pp. 37–42.
8. Nesimmetrichnaja gorjachaja prokatka na shirokopolosnom stane / A.G. Svichinskij, E.V. Binkevich, V.L. Mazur, A. K. Golubchenko // Stal. – 1992. – No 11. – pp. 41–44.

***Сатонін О.В., Коренко М.Г., Стріченко С.М., Староста Н.В., Таранін Д.Ю.*** **Аналіз впливу технологічних параметрів процесу гарячої прокатки смугових профілів у чистових робочих клітях дрібносортних станів.**

*Представлені результати проведеного аналізу впливу умов реалізації процесу гарячої прокатки смугових профілів різного типорозміру і розроблені практичні рекомендації з удосконалення конструктивних параметрів механічного обладнання чистових робочих клітей сортових прокатних станів. Запропонований узагальнений критерій оптимальності інтенсивності зміни ступеню кінематичної асиметрії.*

***Ключові слова:*** *сортамент, модуль жорсткості, осередок деформації, експериментальні дослідження, геометричні характеристики, математична модель.*

***Satonin A.V., Korenko M.G., Strichenko S.M., Starosta N.V., Taranin D.Yu.*** **Analysis of the impact of technological parameters of hot rolling of strip profiles in finishing stands of small-section rolling mills.**

*The purpose of the work is analyzing the influence of hot rolling conditions of strip profiles of different type and dimensions and developing of scientifically substantiated practical recommendations concerning improvement of design parameters of mechanical equipment of finishing stands of small-section rolling mills for enhancing of technical and economic indicators of strip profiles production.*

*The quantitative and qualitative estimates of impact of initial technological and design parameters on the basic technical and economic indicators of strip profiles production has been executed by generalization of numerical implementation of mathematical models with sufficient credibility value verified experimentally. The technological modes and designs of working stands in finishing group of small-section rolling mill 250.*

*The quantitative and qualitative descriptions of impact mechanisms of geometric parameter and materials of initial billets, radii of working rolls, conditions of external friction and degree of kinematic asymmetry.*

*The generalized optimality criterion has proposed. It has established that intensity of changing the degree of kinematic asymmetry is 1-1.5 with accounting a real turndown of initial thicknesses and temperatures.*

***Keywords:*** *assortment, modulus of rigidity, deformation zone, experimental studies, geometrical characteristics, mathematical model.*

Сатонин А.В. – доктор технических наук, профессор Донбасской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск,
e-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Коренко М.Г. – кандидат технических наук, ст. преподаватель Криворожского металлургического института Государственного высшего учебного заведения «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог,
e-mail: marinak 2010@bk.ru

Стриченко С.М. – кандидат технических наук, главный специалист по сталеплавильному производству технического управления, Публичное акционерное общество «Енакиевский металлургический завод», г. Енакиево,
e-mail: Sergey.Strichenko@enakievosteel.com

Староста Н.В. - аспирант Донбасской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск,
e-mail: starosta-n@mail.ru

Таранин Д.Ю. – студент Криворожского металлургического института Государственного высшего учебного заведения «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог,
e-mail: marinak 2010@bk.ru.