

Обработка металлов давлением. Технологии и машины обработки давлением Metal forming. Technology and equipment of metal forming

Научная статья
УДК 621.789
DOI: 10.14529/met220304

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАТАНКИ 5,5–6,5 мм ИЗ СТАЛИ МАРОК 70–75

А.Б. Моллер, *a.moller@magtu.ru*
С.А. Левандовский, *s.levandovsky@magtu.ru*
Д.А. Назаров, *seo@kolibri-group.ru*
Н.А. Баранов, *nikita_ram96@mail.ru*
М.Е. Ишметьев, *matvey280798@gmail.com*

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
Магнитогорск, Россия*

Аннотация. В 2019 году была проведена модернизация линии воздушного охлаждения стана 170 ПАО «ММК». Она была направлена на получение сорбитизированной катанки непосредственно на стане. Применение такой продукции позволяет отказаться от одной промежуточной операции термической обработки в процессе производства проволоки, а также повысить стабильность механических свойств готовой проволоки, производимой из такой катанки. Учитывая особенности укладки катанки на линии воздушного охлаждения за прокатным станом, со стороны метизных предприятий предъявляются следующие требования к равномерности механических свойств получаемой катанки: не более 40 Н/мм² по длине витка, 50 Н/мм² по длине мотка, 60 Н/мм² по плавке. При анализе образцов проката из стали марок 70–75 диаметром 5,5–6,5 мм было выявлено, что полное соблюдение требований метизных предприятий на действующих прокатных станах затруднено. По заказу ПАО «ММК» в рамках научных исследований по освоению технологии производства катанки на линии воздушного охлаждения была разработана математическая модель, адекватность которой была доказана с помощью разработки режимов прокатки на ее базе с последующей оценкой полученной продукции. При дальнейшем анализе полученного проката было обнаружено, что произведенная по новым режимам продукция в большей степени отвечает требованиям по неравномерности механических свойств по длине витка, мотка и партии.

Ключевые слова: сортовой прокат, катанка, сорбитизация, перлит, воздушное охлаждение, временное сопротивление металла разрыву, микроструктура, балл зерна

Для цитирования: Обеспечение равномерности механических свойств катанки 5,5–6,5 мм из стали марок 70–75 / А.Б. Моллер, С.А. Левандовский, Д.А. Назаров и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2022. Т. 22, № 3. С. 48–56. DOI: 10.14529/met220304

Original article

DOI: 10.14529/met220304

ENSURING UNIFORM MECHANICAL PROPERTIES OF WIRE ROD 5.5–6.5 mm FROM STEEL GRADES 70–75

A.B. Moller, *a.moller@magtu.ru*

S.A. Levandovsky, *s.levandovsky@magtu.ru*

D.A. Nazarov, *seo@kolibri-group.ru*

N.A. Baranov, *nikita_ram96@mail.ru*

M.E. Ishmetiev, *matvey280798@gmail.com*

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. In 2019, the air-cooling line of Mill 170 of PJSC MMK was upgraded. It was aimed at obtaining sorbitized wire rod directly on the mill. The use of such products makes it possible to abandon one intermediate heat treatment operation in the wire production process, as well as to increase the stability of the mechanical properties of the finished wire produced from such wire rod. Taking into account the peculiarities of laying wire rod on the air cooling line behind the rolling mill, the hardware enterprises impose the following requirements on the uniformity of the mechanical properties of the resulting wire rod – no more than 40 N/mm² along the length of the coil, 50 N/mm² along the length of the coil, 60 N/mm² for melting. When analyzing samples of rolled products from steel grades 70–75 with a diameter of 5.5–6.5 mm, it was found that full compliance with the requirements of hardware enterprises at existing rolling mills is difficult. By order of PJSC MMK, as part of scientific research on mastering the technology of wire rod production on an air cooling line, a mathematical model was developed, the adequacy of which was proved by developing rolling modes based on it, followed by evaluation of the resulting product. Upon further analysis of the obtained rolled products, it was found that the products produced according to the new modes meet the requirements for uneven mechanical properties along the length of the coil, coil and batch to a greater extent.

Keywords: long products, wire rod, sorbitization, perlite, air cooling, tensile strength of metal, microstructure, grain grade

For citation: Moller A.B., Levandovsky S.A., Nazarov D.A., Baranov N.A., Ishmetiev M.E. Ensuring uniform mechanical properties of wire rod 5.5–6.5 mm from steel grades 70–75. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2022;22(3):48–56. (In Russ.) DOI: 10.14529/met220304

Введение

Структура сорбитообразного перлита в условиях метизных заводов достигается патентированием г/к проката диаметром 5,5–16,0 мм из высокоуглеродистых марок стали. Данная структура необходима для обеспечения безобрывного волочения горячекатаного подката с высокой степенью деформации и получения готовой проволоки ответственного назначения (арматурной, пружинной, канатной и др.) в соответствии с требованиями НД.

Применение сорбитизированной в исходном состоянии катанки позволит отказаться от одной промежуточной операции термической обработки в процессе производства проволоки, а также обеспечит стабильность механических свойств готовой проволоки всего размерного сортамента.

Сорбитизированная катанка характеризуется высокими прочностными пластическими

свойствами, что особенно важно при производстве проволоки без промежуточной операции патентирования [1].

На данный момент поставка металлоподката на метизные заводы осуществляется по ТУ, однако заложенное в требованиях ТУ содержание пластинчатого перлита 1–2 балла оказывается недостаточным для обеспечения стабильных и надежных эксплуатационных характеристик готовой проволоки и изделий, изготовленных из нее, а также не позволяет исключить промежуточные операции волочения и патентирования из технологического процесса изготовления проволоки.

Применение сорбитизированной катанки с повышенной степенью дисперсности перлита 1–2 балла (не менее 85 %) позволит исключить при производстве пружинной, канатной, арматурной, проволоки для сеток и СТАП-проволоки два передела, волочение

передельной заготовки и патентирование. Требуется обеспечение нового уровня дисперсности перлитной микроструктуры, равномерности механических свойств (не более 40 Н/мм² по длине витка, 50 Н/мм² по длине мотка, 60 Н/мм² по плавке) и микроструктуры по длине мотка для снижения издержек сквозной технологии [2].

Модель расчета температуры катанки на КВО

Модель расчета температуры катанки на КВО была разработана на основе определения теплового потока, излучаемого поверхностью катанки в окружающее пространство в пределах полусферического телесного угла и передаваемого конвекцией от катанки охлаждающему воздуху вентиляторов.

Тепловой поток, Вт, излучаемый поверхностью серого тела, определяли по закону Стефана – Больцмана:

$$Q_{\text{И}} = C_s \varepsilon (t_k / 100)^4 F, \quad (1)$$

где $C_s = 5,77 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

ε – степень черноты катанки (принято, что $\varepsilon \approx 0,8$);

t_k – температура катанки, К;

F – площадь поверхности катанки в заданной зоне КВО, м².

Таким образом, формула (1) позволяет определить тепловой поток, передаваемый за счет излучения от катанки в окружающее пространство. При этом величина теплового потока будет зависеть от того, какая часть витка катанки находится в заданной зоне КВО, и от температуры катанки в заданной зоне. Всего рассматривались две зоны по ширине КВО: зона с плотной укладкой катанки – «косички», и средняя зона, с более разряженной укладкой витков (центр). При желании количество рассчитываемых зон может быть увеличено в зависимости от конструкции дутьевых коллекторов [3].

Уравнение для расчета передачи тепла, Вт, конвекцией между катанкой и нагнетаемым воздухом имеет вид

$$Q_{\text{К}} = \alpha \Delta t F, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м² · К);

Δt – разница температур катанки и воздуха, градус;

F – площадь поверхности катанки в заданной зоне КВО, м².

Коэффициент теплоотдачи конвекцией будем определять по формуле для случая обтекания пучка прутков потоком воздуха:

$$\alpha = 0,177 K_Z \left(\frac{\lambda}{d} \right) \text{Re}^{0,64}, \quad (3)$$

где d – диаметр катанки, м;

K_Z – коэффициент, учитывающий плотность укладки витков катанки в разных зонах;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К);

Re – число Рейнольдса.

Для определения коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры катанки было найдено уравнение регрессии для рассматриваемых марок стали:

$$\lambda = 48,5 - 0,0225 t_k, \quad (4)$$

где t_k – температура катанки, °С.

Число Рейнольдса определяли по формуле

$$\text{Re} = \frac{\omega d}{\nu}, \quad (5)$$

где ω – скорость нагнетаемого воздуха, м/с;

ν – кинематическая вязкость воздуха, $15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при 20 °С.

Таким образом, мы можем определить тепловой поток от катанки в окружающее пространство за счет основных тепловых потерь от излучения и конвекции [4]. В то же время мы можем определить тепловой поток от катанки при падении ее температуры на заданную величину за определенное время в зависимости от теплоемкости катанки:

$$Q_{\text{С}} = C M_k \frac{t_k^i - t_k^{i-1}}{\tau^i}, \quad (6)$$

где C – удельная теплоемкость катанки в зависимости от ее температуры, Дж/(кг · град);

M_k – масса катанки в заданной зоне КВО, кг;

i – номер секции по длине КВО;

t_k^i – температура катанки в конце i -й секции заданной зоны КВО, °С;

t_k^{i-1} – температура катанки в конце $(i-1)$ -й секции заданной зоны КВО, °С;

τ^i – время нахождения катанки на i -й секции КВО, с.

Отсюда, усредняя величину теплового потока в пределах одной секции, получаем

рекуррентное уравнение с одним неизвестным, а именно текущей температурой катанки:

$$Q_c = Q_{И} Q_{к}. \quad (7)$$

Последовательно решая данное уравнение для каждой секции и в каждой зоне КВО, мы можем найти распределение температуры катанки по длине и ширине КВО.

При этом параметрами, управляющими величиной температуры катанки в заданной точке, будут:

- начальная температура катанки на виткообразователе;
- скорость транспортера секции КВО;
- скорость вентилятора в рассматриваемой секции, в процентах от максимальной;
- положение заслонок, перераспределяющих воздушный поток от вентилятора по зонам КВО, что влияет на скорость воздуха в заданной зоне [5].

Оценка механических свойств

Вырезка проб из отобранных колец катанки выполнялась согласно утвержденной методике – из колец, взятых из передней, задней частей и середины мотка вырезалось по 4 пробы длиной 500 мм по схеме (рис. 1)

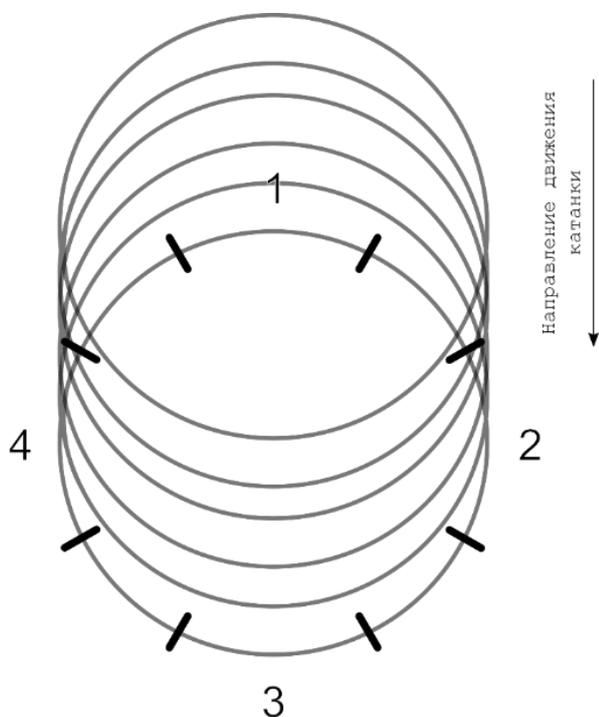


Рис. 1. Схема вырезания проб
Fig. 1. Scheme of sample cutting

Из вырезанных проб изготавливались образцы для проведения механических испыта-

ний в соответствии с требованиями и оценки микроструктуры согласно ГОСТ 8233–56.

Подготовка образцов

для механических испытаний

В ходе испытаний были оценены и сравнены с требованиями ТУ следующие механические характеристики катанки:

- временное сопротивление разрыву;
- величина относительного сужения;
- величина относительного удлинения.

В ТУ в качестве основного документа для проведения испытаний механических свойств указан ГОСТ 1497–84. Применялся ГОСТ 1497–84 – последняя актуальная редакция данного документа [6]. В качестве характеристики относительного удлинения указана δ_{10} – т. е. испытания должны проводиться на длинных образцах по ГОСТ 1497–84.

Из образцов полной длины с помощью болторезов были изготовлены образцы рабочей длины.

Разметка рабочей и начальной расчетной длины образцов производилась при помощи металлической линейки (ГОСТ 427–75). На образцах были сделаны насечки твердосплавной чертилкой и маркером контрастного с образцом цвета.

Проведение механических испытаний

Испытания проводились на машине Shimadzu AG-300KN-1 (класс точности 1 %) в НИИ Наносталей МГТУ им. Г.И. Носова.

Определялись характеристики: временного сопротивления, относительного сужения и относительного удлинения. Относительное удлинение расчетной длины образца измеряли с использованием видеоэкстензометра машины Shimadzu AG-300KN-1 (рис. 2) и при помощи ручного измерения (штангенциркулем). Относительное сужение измеряли при помощи штангенциркуля методом складывания образца после разрушения с замером узкого места. Временное сопротивление измеряли при помощи программного обеспечения универсальной испытательной машины Shimadzu AG-300KN-1 [7].

Были проведены испытания по сравнительной оценке механических свойств катанки 5,5 мм стали марки 70 (рис. 3).

В случае разрушения образца за пределами области расчетной длины учитываются показатели временного сопротивления и относи-



Рис. 2. Универсальная испытательная разрывная машина Shimadzu AG-300KN-1
Fig. 2. Shimadzu AG-300KN-1 Universal Tensile Testing Machine



Рис. 3. Образец до испытания и после разрыва
Fig. 3. Sample before testing and after rupture

тельного сужения при возможности их достоверного определения, а относительное удлинение к анализу не принимается. По договоренности с участниками комиссионных испытаний для подобных образцов для анализа учитываются показатели временного сопротивле-

ния и относительного сужения при возможности их достоверного определения. Не принимаемые к анализу результаты в табл. 1 и 2 выделены цветом.

Результаты измерений представлены в табл. 1–6.

Результаты механических испытаний катанки 5,5 мм из стали 70 (стандартный режим)

Таблица 1

Table 1

The results of mechanical tests of wire rod 5.5 mm from steel 70 (standard mode)

Место	Градусы	Временное сопротивление σ_b , Н/мм ²	Относительное сужение ψ , %	Относительное удлинение, δ_{10} , %
Зад	0	1069	43	11,9
	90	1063	45	8,7
	180	1111	46	13,5
	270	1007	42	10
Середина	0	1033	47	13,5
	90	1022	–	8,5
	180	1059	49	13,1
	270	1085	50	10,4
Перед	0	1130	44	11,6
	90	1035	–	8,6
	180	1077	47	8,5
	270	1085	44	12,5

Результаты механических испытаний катанки 5,5 мм из стали 70 (экспериментальный режим)

Таблица 2

Table 2

The results of mechanical tests of wire rod 5.5 mm from steel 70 (experimental mode)

Место	Градусы	Временное сопротивление σ_b , Н/мм ²	Относительное сужение ψ , %	Относительное удлинение, δ_{10} , %
Зад	0	1054	44	13,6
	90	1069	44	15,1
	180	1048	42	13,5
	270	1076	50	8,3
Середина	0	1073	46	13,1
	90	1122	47	11,9
	180	1110	48	12,2
	270	1126	49	13,5
Перед	0	1056	43	17,2
	90	1142	45	12,9
	180	1058	45	12,5
	270	1085	43	10,8

Оценка временного сопротивления разрыву образцов катанки 5,5 мм из стали 70 (стандартный режим)

Таблица 3

Table 3

Evaluation of the tensile strength of 5.5 mm wire rod samples from steel 70 (standard mode)

Параметры		Расположение			
		0	90	180	270
Стандарт (действующий режим)	Зад	1069	1063	1111	1007
	Середина	1033	1022	1059	1085
	Перед	1130	1035	1077	1085
Оценка равномерности по длине мотка в 1 точке	MIN	1033	1022	1059	1007
	MAX	1130	1063	1111	1085
	СР. знач	1077	1040	1082	1059
	Размах	97	41	52	78

Таблица 4

Оценка временного сопротивления разрыву образцов катанки 5,5 мм из стали 70
(стандартный режим)

Table 4

Evaluation of the tensile strength of 5.5 mm wire rod samples from steel 70 (standard mode)

Параметры		Оценка равномерности по длине витка / по всей заготовке			
		MIN	MAX	СР. знач	Размах
Стандарт (действующий режим)	Зад	1007	1111	1063	104
	Середина	1022	1085	1050	63
	Перед	1035	1130	1082	95
Оценка равномерности по длине мотка в 1 точке	MIN	1007			
	MAX		1130		
	СР. знач			1065	
	Размах				123

Таблица 5

Оценка временного сопротивления разрыву образцов катанки 5,5 мм из стали 70
(экспериментальный режим)

Table 5

Evaluation of the tensile strength of wire rod specimens 5.5 mm from steel 70 (experimental mode)

Параметры		Расположение			
		0	90	180	270
Эксперимент 1	Зад	1047	1047	1069	1050
	Середина	1036	1097	1035	1038
	Перед	1021	1107	1059	1067
Оценка равномерности по длине мотка в 1 точке	MIN	1021	1047	1035	1038
	MAX	1047	1107	1069	1067
	СР. знач	1035	1084	1054	1052
	Размах	26	60	34	29

Таблица 6

Оценка временного сопротивления разрыву образцов катанки 5,5 мм из стали 70
(экспериментальный режим)

Table 6

Evaluation of the tensile strength of wire rod specimens 5.5 mm from steel 70 (experimental mode)

Параметры		Оценка равномерности по длине витка / по всей заготовке			
		MIN	MAX	СР. знач	Размах
Эксперимент 1	Зад	1047	1069	1053	23
	Середина	1035	1097	1052	62
	Перед	1021	1107	1063	87
Оценка равномерности по длине мотка в 1 точке	MIN	1021			
	MAX		1107		
	СР. знач			1056	
	Размах				87

Выводы

На основе полученных данных можно заключить, что:

- механические свойства находятся в пределах требований актуальных ТУ;
- равномерность по величине временного

сопротивления разрыву не соблюдается ни для стандартного, ни для экспериментального режима.

Для стандартного режима:

- по длине витка $\leq 104 \text{ Н/мм}^2$
(норма $\leq 40 \text{ Н/мм}^2$);

- по длине мотка ≤ 97 Н/мм²
(норма ≤ 50 Н/мм²);
- по плавке ≤ 104 Н/мм²
(норма ≤ 60 Н/мм²).

Для экспериментального режима (первый образец):

- по длине витка ≤ 60 Н/мм²
(норма ≤ 40 Н/мм²);
- по длине мотка ≤ 87 Н/мм²
(норма из ТЗ ≤ 50 Н/мм²);
- по плавке ≤ 87 Н/мм²
(норма из ТЗ ≤ 60 Н/мм²).

При анализе данных видно, что для экспериментального режима удалось достичь равномерности временного сопротивления раз-

рыву по длине мотка для следующих случаев:

- 0° – разброс 26 Н/мм²
(норма ≤ 50 Н/мм²);
- 180° – разброс 34 Н/мм²
(норма ≤ 50 Н/мм²);
- 270° – разброс 29 Н/мм²
(норма ≤ 50 Н/мм²).

Также удалось приблизиться к требуемой равномерности временного сопротивления разрыву по длине витков, отобранных с заднего конца экспериментального образца 23 Н/мм² при норме ≤ 40 Н/мм².

Продолжена работа над усовершенствованием режимов для получения требуемой равномерности по плавке.

Список литературы

1. Тулупов О.Н., Моллер А.Б. Эволюция методологического подхода к моделированию процессов сортовой прокатки в МГТУ им. Г.И. Носова // *Сталь*. 2014. № 4. С. 25–34.
2. Tulupov O.N., Moller A.B., Sarancha S.Y. Increasing of long products rolling efficiency: Modernization of stelmor air cooling line to obtain sorbitized wire rod // *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 265. P. 1116–1122. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.1116
3. Реконструкция линии воздушного охлаждения мелкосортного стана с целью снижения производственных издержек / С.Ю. Саранча, С.А. Левандовский, А.Б. Моллер и др. // *Сталь*. 2017. № 5. С. 38–42.
4. Moller A.B., Tulupov O.N., Fedoseev S.A. Improvement of surface quality of rolled section steel for springs manufacturing // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017. Vol. 52, no. 4. P. 647–654.
5. Structural-matrix models for long product rolling processes: modeling production traceability and forming consumer properties of products / O.N. Tulupov, A.B. Moller, D.I. Kinzin et al. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2013. Т. 5 (45). С. 46–50.
6. Rumyantsev M.I., Tulupov O.N. Further developments in simulation of metal forming processes // *CIS Iron and Steel Review*. 2018. Vol. 16. P. 21–24. DOI: 10.17580/cisirs.2018.02.04
7. Kinzin D.I., Levandovskiy S.A., Tulupov O.N. Analysis of efficiency of roll pass design options for roughing stands of section rolling mill // *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 265. P. 1136–1141. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.1136

References

1. Tulupov O.N., Moller A.B. Simulation of bar rolling: Experience at Nosov Magnitogorsk State Technical University. *Steel in Translation*. 2014;4(44):280–288. DOI: 10.3103/S0967091214040172
2. Tulupov O.N., Moller A.B., Sarancha S.Y. Increasing of long products rolling efficiency: Modernization of stelmor air cooling line to obtain sorbitized wire rod. *Solid State Phenomena*. 2017;265:1116–1122. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.1116
3. Sarancha S.Y., Levandovskii S.A., Moller A.B., Kinzin D.I., Tulupov O.N. Cost-saving reconstruction of the air-cooling line in a small-bar mill. *Steel in Translation*. 2017;5(47):334–338. DOI: 10.3103/S0967091217050126
4. Moller A.B., Tulupov O.N., Fedoseev S.A. Improvement of surface quality of rolled section steel for springs manufacturing. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017;52(4):647–654.
5. Tulupov O.N., Moller A.B., Kinzin D.I., Levandovskii S.A., Ruchinskaya N.A., Nalivaiko A.V. et al. Structural-matrix models for long product rolling processes: modeling production traceability and forming consumer properties of products. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2013;5(45):46–50.

6. Romyantsev M.I., Tulupov O.N. Further developments in simulation of metal forming processes. *CIS Iron and Steel Review*. 2018;16:21–24. DOI: 10.17580/cisr.2018.02.04

7. Kinzin D.I., Levandovskiy S.A., Tulupov O.N. Analysis of efficiency of roll pass design options for roughing stands of section rolling mill. *Solid State Phenomena*. 2017;265:1136–1141. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.1136

Информация об авторах

Моллер Александр Борисович, д-р техн. наук, проф. кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; a.moller@magtu.ru.

Левандовский Сергей Анатольевич, канд. техн. наук, доц. кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; s.levandovsky@magtu.ru.

Назаров Дмитрий Алексеевич, аспирант кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; seo@kolibri-group.ru.

Баранов Никита Алексеевич, аспирант кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; nikita_ram96@mail.ru.

Ишметьев Матвей Евгеньевич, магистрант кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; matvey280798@gmail.com.

Information about the authors

Aleksandr B. Moller, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Materials Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; a.moller@magtu.ru.

Sergey A. Levandovsky, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Materials Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; s.levandovsky@magtu.ru.

Dmitriy A. Nazarov, Postgraduate Student of the Department of Materials Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; seo@kolibri-group.ru.

Nikita A. Baranov, Postgraduate Student of the Department of Materials Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; nikita_ram96@mail.ru.

Matvey E. Ishmetiev, Master's Student of the Department of Materials Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; matvey280798@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 18.03.2022

The article was submitted 18.03.2022