

УДК 621.771.252.04: 620.18;51.001.57

Раздобреев В. Г.  
Паламарь Д. Г.  
Токмаков П. В.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АРМАТУРНОГО ПРОКАТА И КАТАНКИ

В Институте черной металлургии НАН Украины были разработаны математические модели и компьютерные программы прогнозирования стабильности показателей качества горячекатаного полосового проката [1–7]. Отличительной особенностью этих программ является возможность реализации метода статистических испытаний (Монте-Карло). Для этого компьютерные программы были дополнены блоками, позволяющими учитывать стохастический характер технологических параметров и оценивать закономерности распределения расчетных величин.

Аналогичные программы были разработаны для прогнозирования стабильности показателей качества арматурного проката и катанки. Основные подходы и методы расчетов, используемые в базовых программах, изложены в публикациях [1, 8–11].

Цель работы – оценка закономерностей распределения расчетных величин механических свойств арматурного проката и катанки на основе применения разработанной математической модели формирования структуры и механических свойств готового проката с учетом стохастического характера технологических параметров производства сортового проката.

Разработанная программа, исходя из заданных средних значений и среднего квадратического отклонения, позволяет автоматически определять случайные значения следующих исходных параметров:

- содержание химических элементов в стали;
- радиус проката;
- температура конца прокатки (начала охлаждения);
- скорость прокатки;
- накопленная степень деформации;
- эффективность последеформационного охлаждения водой, которая зависит, в основном, от колебаний температуры и давления воды, а также степени засорения устройств подачи воды.

Изменение эффективности охлаждения учитывается в том случае, если расчетный диапазон колебаний температуры самоотпуска, который определяется колебаниями температуры конца прокатки, скорости прокатки и радиуса проката, существенно меньше, чем фактический.

В качестве выходных параметров для заданного количества реализаций (опытов) рассчитываются механические свойства проката (предел текучести, временное сопротивление разрыву и относительное удлинение  $\delta_5$ ).

На рис. 1 и в табл. 1 приведены гистограммы распределения и статистические характеристики фактических значений содержания основных химических элементов в стали марки Ст4сп для производства арматурного проката № 25 класса прочности А500, а также температуры конца прокатки и самоотпуска. Объем выборки – 310 плавок.

На рис. 2 показана гистограмма распределения расчетных значений температуры самоотпуска. Среднее расчетное значение температуры 577 °С, минимальное – 549 °С, максимальное – 593 °С, среднее квадратическое отклонение 7,2 °С. Эти значения близки к фактическим (см. табл. 1).

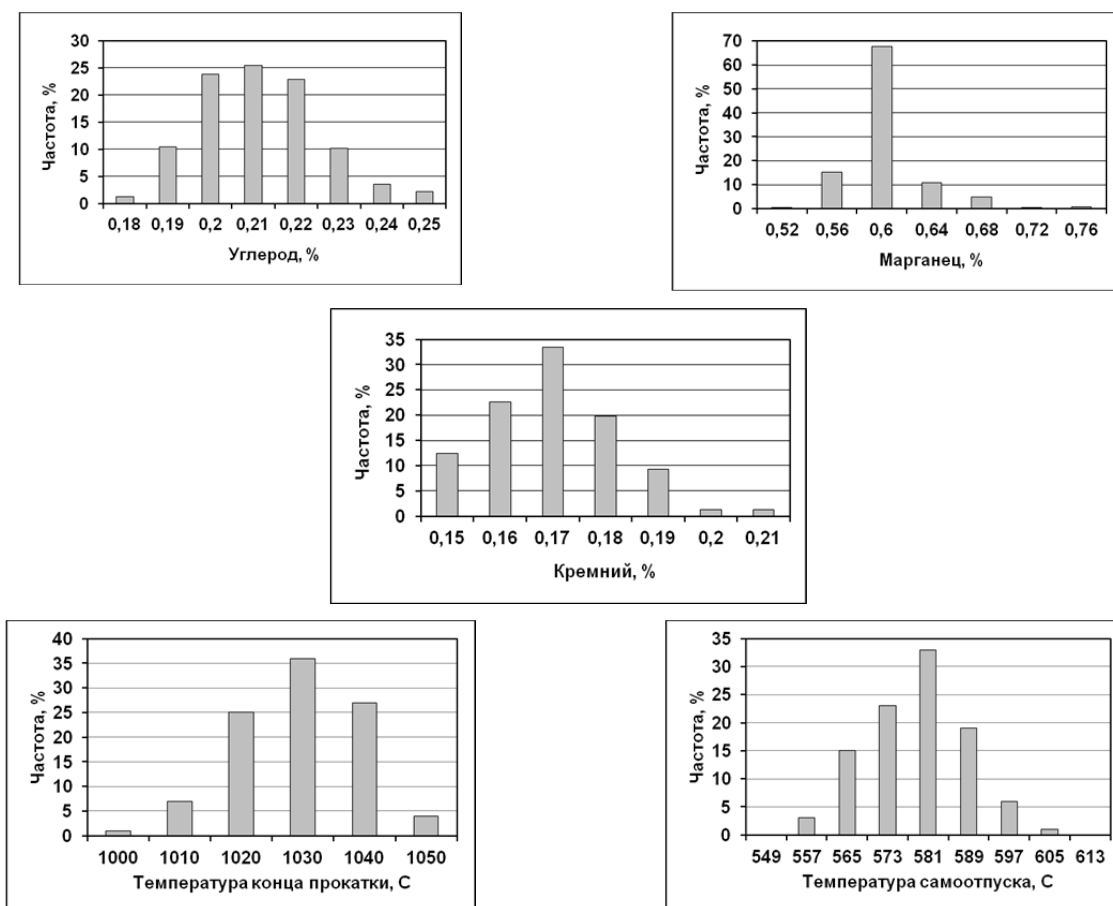


Рис. 1. Гистограммы распределения значений содержания основных химических элементов в стали марки Ст4сп для производства арматурного проката № 25, температуры конца прокатки и самоотпуска

Таблица 1

Статистические характеристики распределения значений содержания основных химических элементов в стали марки Ст4сп для производства арматурного проката № 25 и температуры самоотпуска

Наименование параметров	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее квадратическое отклонение	Допустимые значения
C, %	0,211	0,18	0,25	0,014	≤ 0,25
Mn, %	0,59	0,52	0,76	0,030	-
Si, %	0,17	0,15	0,21	0,013	-
Tкп, °С	1027	1000	1050	9,9	-
Tсо, °С	575	550	600	9,8	-



Рис. 2. Гистограмма распределения расчетных значений температуры самоотпуска

На рис. 3 и в табл. 2 показаны фактические и расчетные параметры распределения значений механических свойств арматурного проката № 25 из стали марки Ст4сп.

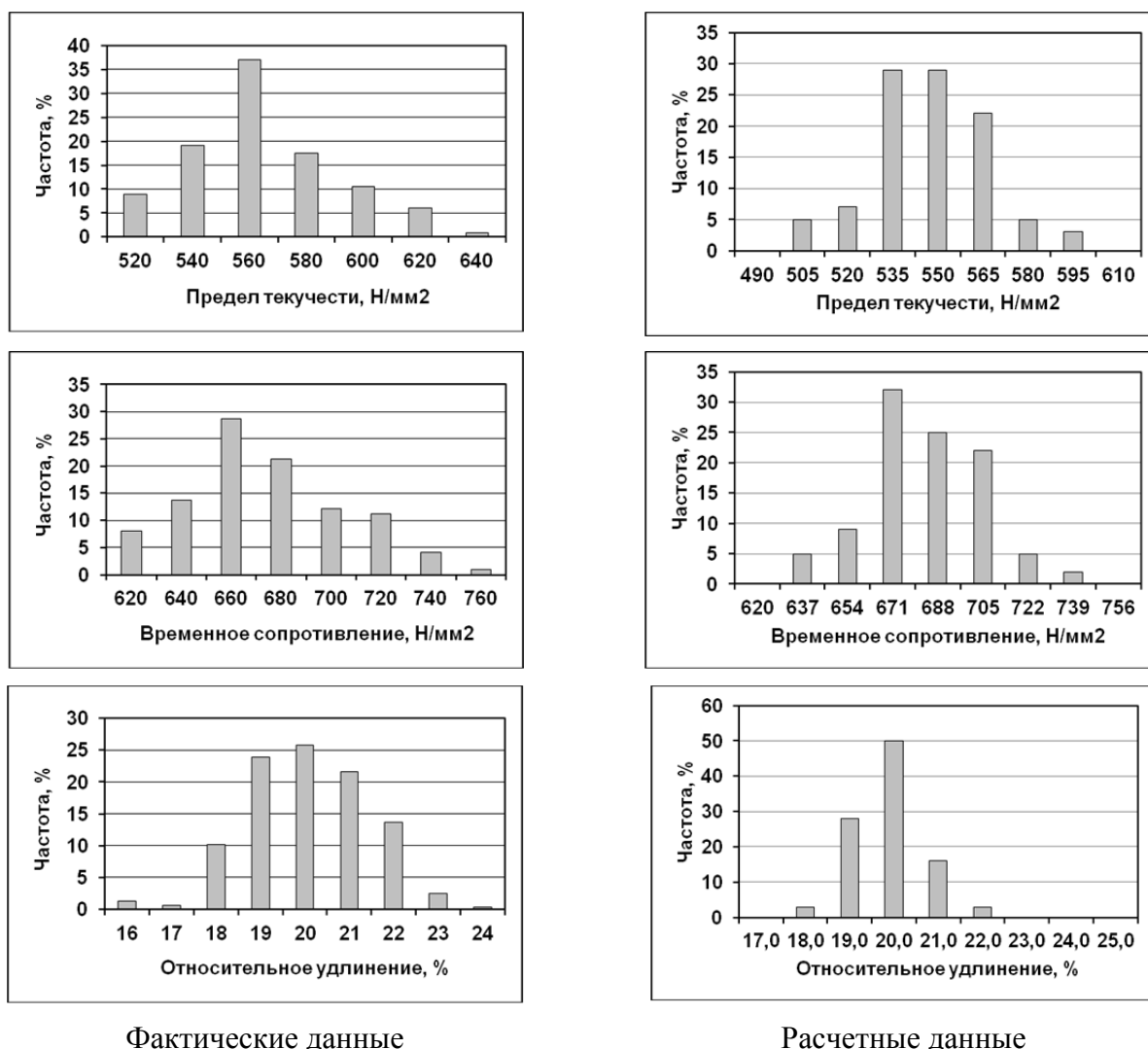


Рис. 3. Гистограммы распределения механических свойств арматурного проката № 25 из стали марки Ст4сп

Таблица 2

Статистические характеристики фактических и расчетных показателей качества арматурного проката № 25 из стали марки Ст4сп

Наименование параметров	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее квадратическое отклонение	Допустимые значения
$\sigma_T, \text{Н/мм}^2$	554/539	502/490	626/592	26,5/19,8	$\geq 500$
$\sigma_B, \text{Н/мм}^2$	665/675	602/620	747/738	31,5/23,4	$\geq 600$
$\delta_5, \%$	19,7/19,4	15,5/17,6	23,5/21,5	1,37/0,76	$\geq 14$

Примечание. Слева от косой черты – фактические данные, справа - расчетные

Полученные данные позволяют сделать вывод о надежности прогнозирования средних значений и колебаний механических свойств арматурного проката.

Аналогичная компьютерная программа разработана для прогнозирования механических свойств катанки. Разработанная программа, исходя из заданных средних значений и среднего квадратического отклонения, позволяет автоматически определять случайные значения следующих исходных параметров:

- содержание химических элементов в стали;
- радиус проката;
- температура конца прокатки (начала охлаждения);
- накопленная степень деформации;
- эффективность последеформационного охлаждения водой, которая зависит, в основном, от колебаний температуры и давления воды, а также степени засорения устройств подачи воды, и охлаждения на транспортере линии Стелмор, которая зависит от температуры воздуха, состояния вентиляторов и экранов, а так же колебаний плотности укладки витков.

В качестве выходных параметров для заданного количества реализаций (опытов) рассчитываются механические свойства проката (предел текучести, временное сопротивление разрыву, относительное удлинение  $\delta_5$  и  $\delta_{200}$ , относительное сужение).

В табл. 3 и на рис. 4 приведены гистограммы распределения и статистические характеристики фактических значений содержания основных химических элементов в стали марки SAE 1006 для производства катанки диаметром 5,5 мм. Объем выборки – 70 плавок (440 партий).

Таблица 3

Статистические характеристики распределения значений содержания основных химических элементов в стали марки SAE 1006 для производства катанки диаметром 5,5 мм и температуры за виткообразователем

Наименование параметров	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее квадратическое отклонение	Допустимые значения
C, %	0,063	0,04	0,08	0,010	$\leq 0,08$
Mn, %	0,363	0,33	0,40	0,018	0,25-0,45
Si, %	0,078	0,05	0,10	0,013	по заказу
T <sub>во</sub> , °C	930	910	950	8,7	-

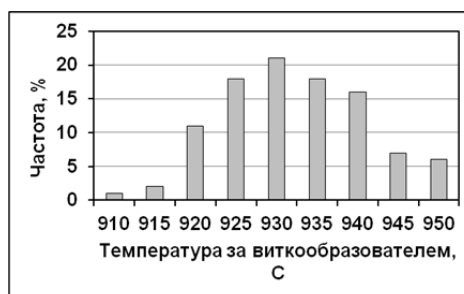
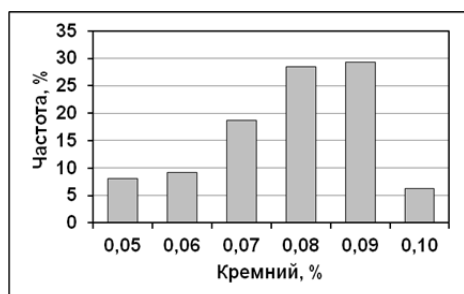
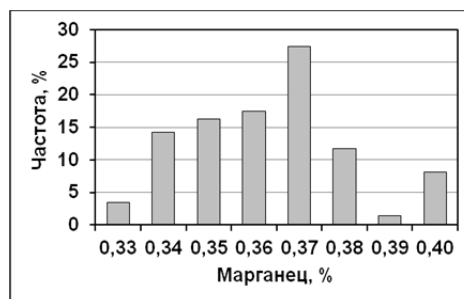
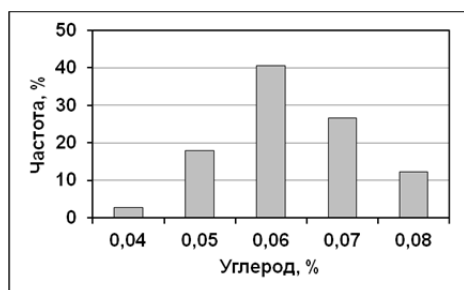


Рис. 4. Гистограммы распределения значений содержания основных химических элементов в стали марки SAE 1006 для производства катанки диаметром 5,5 мм и температуры за виткообразователем

На рис. 5 показана гистограмма распределения расчетных значений температуры за виткообразователем. Среднее расчетное значение температуры 927 °C, минимальное – 899 °C, максимальное – 960 °C, среднее квадратическое отклонение 11,4 °C. Эти значения близки к фактическим (см. табл. 3).

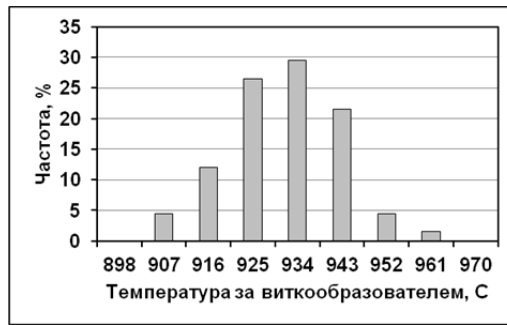
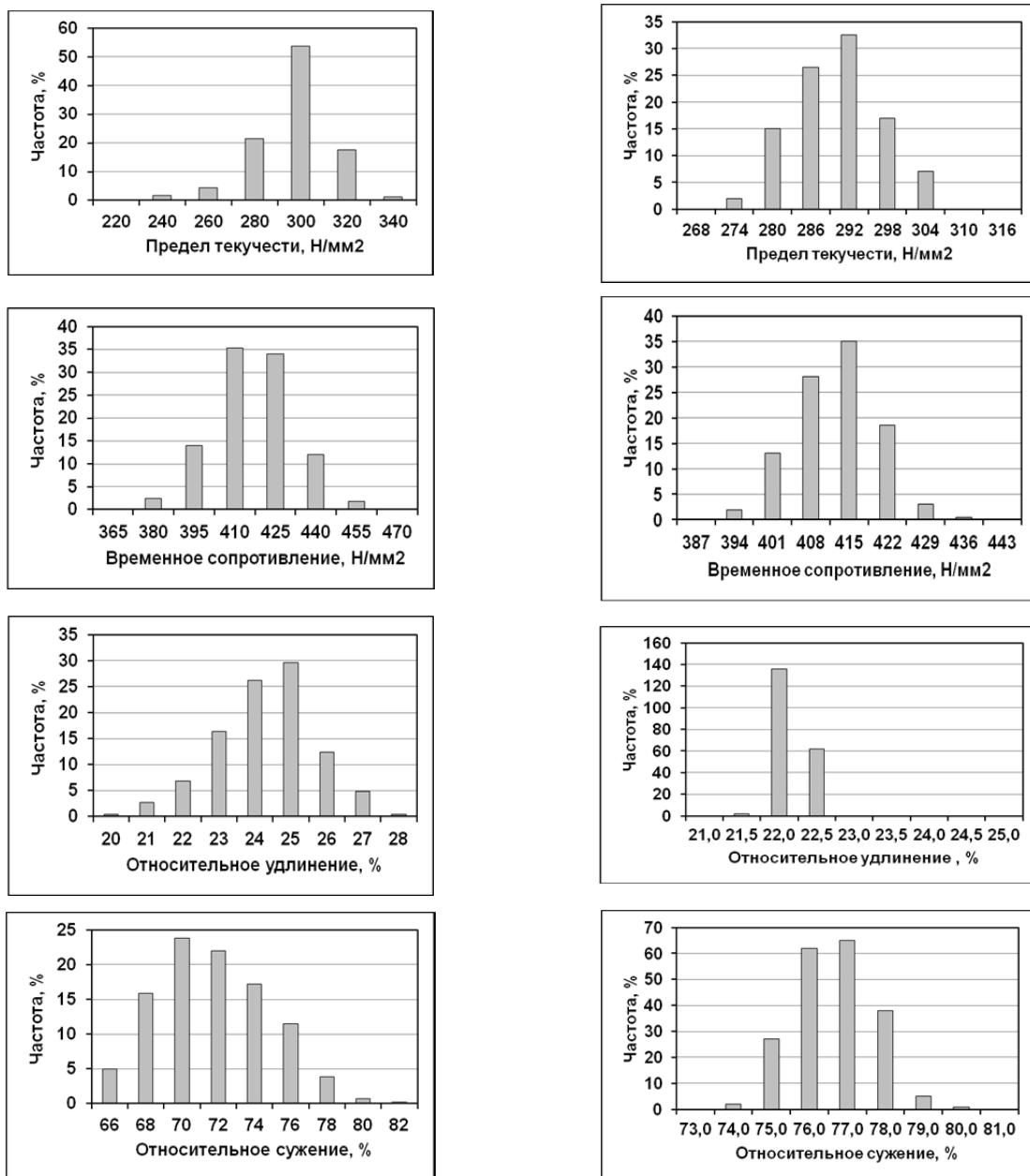


Рис. 5. Гистограмма распределения расчетных значений температуры за виткообразователем

На рис. 6 и в табл. 4 показаны фактические и расчетные параметры распределения значений механических свойств катанки диаметром 5,5 мм из стали марки SAE 1006.



Фактические данные

Расчетные данные

Рис. 6. Гистограммы распределения механических свойств катанки диаметром 5,5 мм из стали марки SAE 1006

Таблица 4

Статистические характеристики фактических и расчетных показателей качества катанки диаметром 5,5 мм из стали марки SAE 1006

Наименование параметров	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее квадратическое отклонение	Допустимые значения
$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	287/287	220/268	331/304	16,6/7,0	-
$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	410/408	365/387	456/430	14,8/7,5	≤ 470
$\delta_{200}$ , %	24,1/21,9	19,5/21,4	28,0/22,3	1,47/0,2	-
$\psi$ , %	71,2/76,2	66/73,5	81/79	3,0/1,0	≥ 66

Примечание: фактические данные / расчетные.

## ВЫВОДЫ

Разработанные в Институте черной металлургии НАН Украины математические модели и компьютерные программы для прогнозирования стабильности показателей качества арматурного проката и катанки дополнены блоками, которые учитывают стохастический характер технологических параметров производства сортового проката, что дает возможность оценить закономерности распределения расчетных величин. Показано, что сравнение полученных в работе расчетных и фактических значений показателей качества позволяет сделать вывод о надежности прогнозирования средних значений и колебаний механических свойств арматурного проката и катанки. Предложенный подход и результаты выполненных исследований дают возможность разрабатывать технические и технологические решения, направленные на увеличение стабильности показателей качества проката.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ноговицын А. В. Опыт прогнозирования структуры и механических свойств проката из углеродистых и низколегированных сталей на основе расчетных диаграмм изотермического распада аустенита / А. В. Ноговицын, С. А. Воробей, Г. В. Левченко // *Пластическая деформация металлов : коллективная монография*. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 370 с. – С. 91–94.
2. Воробей С. А. Методика расчета величины зерна в горячекатаном прокате с учетом влияния степени разупрочнения металла за время пауз между деформациями / С. А. Воробей, Г. В. Левченко, С. М. Жучков [и др.] // *Металлургия и литейное производство 2007 : труды междунар. конф.* – Жлобин : Беларусь, 2007. – С. 147–150.
3. Воробей С. А. Прогнозирование размера зерен аустенита при горячей деформации стали / С. А. Воробей // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. науч. тр.* – Днепропетровск : Візіон, 2008. – Вып. 18. – С. 222–232.
4. Надежность технологического процесса производства листового проката / В. Л. Мазур, С. А. Воробей, Д. Л. Романовский [и др.]. – К. : Техніка, 1992. – 170 с.
5. Математическая модель формирования микроструктуры и механических свойств углеродистой и низколегированной полосовой горячекатаной стали / А. В. Ноговицын, С. А. Воробей, С. Н. Илюхин, Г. В. Панчоха // *Задачи технического перевооружения листопрокатного производства : труды Всесоюз. науч.-техн. конф.* – Днепропетровск, 1987. – С. 17.
6. Воробей С. А. Особенности расчета сопротивления деформации стали при непрерывной горячей прокатке / С. А. Воробей, Г. В. Левченко // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. науч. тр.* – Днепропетровск : Візіон, 2003. – Вып. 6. – С. 191–196.
7. Исследование влияния температуры и степени деформации на величину зерна феррита в низкоуглеродистой листовой стали / С. А. Воробей, А. В. Янковский, Г. В. Левченко, В. Т. Тилик // *Теория и практика металлургии*. – 2004. – № 5. – С. 25–29.
8. Разработка информационно-аналитической системы непрерывной сортовой прокатки / С. М. Жучков, Д. Г. Паламар, В. Г. Раздобреев, А. П. Иванов // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 3(24). – С. 54–59.
9. Комплексная математическая модель процесса непрерывной прокатки и прогнозирования микроструктуры и механических свойств катанки / В. Г. Раздобреев, С. А. Воробей, Д. Г. Паламарь, А. П. Иванов // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 1(22). – С. 77–83.

10. Энергосберегающие мероприятия при производстве арматурного проката на стане 320 Белорусского металлургического завода / В. Г. Раздобреев, П. В. Токмаков, В. А. Луценко [и др.] // *Черные металлы.* – 2011. – № 6. – С. 19–24.

11. Применение математических моделей для прогнозирования микроструктуры термоупрочненного арматурного проката / Г. В. Левченко, С. А. Воробей, Т. В. Грицай [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2006. – № 4. – С. 82–85.

## REFERENCES

1. Nogovicyn A. V. *Opyt prognozirovaniya struktury i mehanicheskikh svojstv prokata iz uglerodi-styh i nizkolegированных сталей на основе расchetных диаграмм изотермического распада аустенита* / A. V. Nogovicyn, S. A. Vorobej, G. V. Levchenko // *Plasticheskaja deformacija metallov : kollektivnaja monogra-fija.* – Dnepropetrovsk : Akcent PP, 2014. – 370 s. – S. 91–94.

2. Vorobej S. A. *Metodika rascheta velichiny zerna v gorjachekatanom prokate s uchetom vlijaniya stepeni razuprochnenija metalla za vremja pazv mezhdu deformacijami* / S. A. Vorobej, G. V. Levchenko, S. M. Zhuchkov [i dr.] // *Metallurgija i litejnoe proizvodstvo 2007 : trudy mezhdunar. konf.* – Zhlobin : Belarus', 2007. – S. 147–150.

3. Vorobej S. A. *Prognozirovanie razmera zeren austenita pri gorjachej deformacii stali* / S. A. Vorobej // *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii : sb. nauch. tr.* – Dnepropetrovsk : Vizion, 2008. – Вып. 18. – S. 222–232.

4. *Nadezhnost' tehnologicheskogo processa proizvodstva listovogo prokata* / V. L. Mazur, S. A. Vorobej, D. L. Romanovskij [i dr.]. – K. : Tehnika, 1992. – 170 s.

5. *Matematicheskaja model' formirovaniya mikrostruktury i mehanicheskikh svojstv uglerodistoj i nizkolegированной полосовой gorjachekatanoy stali* / A. V. Nogovicyn, S. A. Vorobej, S. N. Iljuhin, G. V. Panchoha // *Zadachi tehničeskogo perevooruzhenija listoprokatnogo proizvodstva : trudy Vsesozuz. nauch.-tehn. konf.* – Dnepropetrovsk, 1987. – S. 17.

6. Vorobej S. A. *Osobennosti rascheta soprotivlenija deformacii stali pri nepreryvnoj gorjachej prokatke* / S. A. Vorobej, G. V. Levchenko // *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii : sb. nauch. tr.* – Dnepropetrovsk : Vizion, 2003. – Вып. 6. – S. 191–196.

7. *Issledovanie vlijaniya temperatury i stepeni deformacii na velichinu zerna ferrita v nizkouglerodistoj listovoj stali* / S. A. Vorobej, A. V. Jankovskij, G. V. Levchenko, V. T. Tilik // *Teorija i praktika metallurgii.* – 2004. – № 5. – S. 25–29.

8. *Razrabotka informacionno-analiticheskoy sistemy nepreryvnoj sortovoj prokatki* / S. M. Zhuchkov, D. G. Palamar, V. G. Razdobreev, A. P. Ivanov // *Obrabotka materialov davlenim : sb. nauch. tr.* – Kramatorsk : DGMA, 2010. – № 3(24). – S. 54–59.

9. *Kompleksnaja matematicheskaja model' processa nepreryvnoj prokatki i prognozirovaniya mikro-struktury i mehanicheskikh svojstv katanki* / V. G. Razdobreev, S. A. Vorobej, D. G. Palamar', A. P. Ivanov // *Obrabotka materialov davlenim : sb. nauch. tr.* – Kramatorsk : DGMA, 2010. – № 1(22). – S. 77–83.

10. *Jenergoberegajushhie meroprijatija pri proizvodstve armaturного prokata na stane 320 Belorus-skogo metallurgicheskogo zavoda* / V. G. Razdobreev, P. V. Tokmakov, V. A. Lucenko [i dr.] // *Chernye metally.* – 2011. – № 6. – С. 19–24.

11. *Primenenie matematicheskikh modelej dlja prognozirovaniya mikrostruktury termouprochnennogo armaturного prokata* / G. V. Levchenko, S. A. Vorobej, T. V. Gricaj [i dr.] // *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'.* – 2006. – № 4. – С. 82–85.

Раздобреев В. Г. – канд. техн. наук, ст. науч. сотруд. ИЧМ НАН Украины;

Паламарь Д. Г. – мл. науч. сотруд. ИЧМ НАН Украины;

Токмаков П. В. – мл. науч. сотруд. ИЧМ НАН Украины;

ИЧМ НАН Украины – Институт черной металлургии Национальной академии наук Украины, г. Днепр.

E-mail: v\_razdobreev@mail.ru; office.isi@nas.gov.ua