

УДК 621.771.252.04: 620.18;51.001.57

Раздобреев В. Г.  
Воробей С. А.  
Паламарь Д. Г.  
Иванов А. П.

## КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАТАНКИ

Основными показателями качества катанки из различных марок сталей являются структура, механические свойства и точность размеров. Как показал опыт новых зарубежных мелкосортных, мелкосортно-проволочных и проволочных станков, применение нормализующей прокатки (температура конца прокатки на 30–50 °С выше  $T_{Ar3}$ ) и термомеханической обработки (температура конца прокатки находится в пределах  $T_{Ar3} - T_{Ar1}$ ) в большинстве случаев позволяет существенно улучшить свойства и структуру проката, снизить затраты на переработку в дальнейшем переделе и улучшить качество готовой продукции [1, 2].

Совершенствование процессов непрерывной прокатки катанки направлено на решение различных технических и технологических задач производства. Это – повышение производительности прокатных станков, повышение точности и качества готового проката, увеличение выхода годного, повышение коэффициента использования стана и т. д.

Решение указанных задач осуществляется путем создания новых технологий, реализуемых на вновь строящихся прокатных станах, и посредством совершенствования режимов прокатки на действующих агрегатах. При этом технически и экономически целесообразно использовать адаптированные к конкретным условиям производства математические модели процессов непрерывной прокатки и последующей термической обработки готового проката [1, 3–6].

Однако, в некоторых работах [3, 5] разработанные математические модели процесса непрерывной прокатки не учитывают реальные условия производства того или иного вида проката, другие же авторы работ [4, 6] математическое моделирование процессов последовательного охлаждения проката производят без учета реальных скоростей его охлаждения, т. е. без построения термокинетических диаграмм для конкретных марок сталей.

В Институте черной металлургии НАН Украины разработаны математические модели расчета температурных, деформационно-скоростных, энергосиловых параметров непрерывной прокатки и прогнозирования механических свойств сортового проката и катанки, которые были объединены в единое комплексное программное обеспечение (ПО). Разработанное ПО позволяет оптимизировать конструктивный состав прокатного стана, режимы прокатки и последовательной обработки с позиций обеспечения требуемого комплекса показателей качества производимой продукции.

Целью данной статьи является описание расчета механических свойств катанки. Исходными данными расчета являются следующие параметры, объединенные в две группы.

1. Параметры, определяемые при моделировании режимов прокатки:

- диаметр катанки;
- скорость прокатки;
- температура конца прокатки;
- накопленная степень деформации после последнего прохода.

2. Дополнительные параметры, задаваемые для блока расчета механических свойств:

- химический состав стали (содержание углерода, марганца, кремния, никеля, хрома, меди, молибдена, титана, алюминия, фосфора, азота);
- длина участка ускоренного охлаждения проката после прокатного стана;
- коэффициент коррекции теплоотдачи на участке ускоренного охлаждения;
- количество расчетных участков линии охлаждения проката (линии «Stelmor»);

– скорость перемещения транспортера;  
– коэффициенты коррекции теплоотдачи по расчетным участкам линии охлаждения проката.

Коэффициенты теплоотдачи рассчитываются по эмпирическим зависимостям, а коэффициенты их коррекции определяются на основе экспериментальных данных, полученных на промышленных устройствах с аналогичными характеристиками.

На рис. 1 и 2 показаны окна с исходными данными для расчета режимов прокатки канатки диаметром 5,5 мм из стали марки Ст 3 кп. На рис. 3 и 4 – с результатами расчета температуры металла и накопленной степени деформации.

Номер	Тип	Наличие кантовки	Разделени	Диаметр	Высота h1	Ширина	Высота	Ширина	Площадь	Зазор	Мощность	Частота	Передаточное	Расстояние
1	г	90	1	550	98	146	0	0	11660	15	0	0	0	3
2	г	0	1	550	100	104	0	0	8200	9	0	0	0	3
3	г	90	1	550	67	120	0	0	6420	9	0	0	0	3
4	г	0	1	450	80	80	0	0	5020	14	0	0	0	3
5	г	90	1	450	48	100	0	0	3900	12	0	0	0	3
6	г	0	1	450	62	62	0	0	3000	12	0	0	0	10
7	г	90	1	450	37	74	0	0	2230	11	0	0	0	2,5
8	г	0	1	450	46	46	0	0	1760	8	0	0	0	2,5
9	г	90	1	390	28	58	0	0	1400	12	0	0	0	2,5
10	г	0	1	390	38	38	0	0	1180	10	0	0	0	2,5
11	г	90	1	390	23	46	0	0	895	8,4	0	0	0	2,5
12	г	0	1	390	32	28	0	0	750	5	0	0	0	15,5
13	г	90	1	340	19	40	0	0	650	4,5	0	0	0	2,5
14	г	0	1	340	25	24	0	0	490	3,8	0	0	0	2,5
15	г	90	1	340	16,4	30	0	0	410	4,6	0	0	0	2,5
16	г	0	1	340	21	21	0	0	345	3	0	0	0	2,5
17	г	90	1	228,34	13,5	24,8	0	0	272,3	3	0	0	0	2,5
18	г	0	1	228,34	17	17	0	0	224	2,5	0	0	0	23
19	г	90	1	210,5	11,5	21,9	0	0	183,5	2,3	0	0	0	1
20	г	0	1	210,5	14,15	14,15	0	0	150,8	2,15	0	0	0	1,2
21	г	90	1	158,75	8,75	18,4	0	0	117,5	1,35	0	0	0	1
22	г	0	1	158,75	11,55	11,5	0	0	97,17	2,05	0	0	0	1,2
23	г	90	1	158,75	6,8	15,2	0	0	75,25	1	0	0	0	1
24	г	0	1	158,75	9,25	9,25	0	0	62,21	1,75	0	0	0	1,2
25	г	90	1	158,75	5,25	12,6	0	0	48,12	1,25	0	0	0	1
26	г	0	1	158,75	7,07	7,07	0	0	39,3	1,47	0	0	0	1,2
27	г	90	1	228,34	4,32	9,1	0	0	31,7	1	0	0	0	1
28	г	0	1	228,34	5,9	5,85	0	0	27,4	1	0	0	0	1,2
29	г	90	1	156	5,48	5,9	0	0	25,6	1	0	0	0	1
30	г	0	1	156	5,58	5,58	0	0	24,4	0,8	0	0	0	1

Рис. 1. Заданная калибровка стана

**Размеры исходной заготовки:**

высота (мм)

ширина (мм)

площадь сечения (мм<sup>2</sup>)

**Размеры готового проката:**

тип

площадь сечения (мм<sup>2</sup>)

Скорость прокатки на выходе из последней клетки(м/с):

Температура исходной заготовки (С):

**Марка стали**

Рис. 2. Исходные данные для расчета

Окно для ввода дополнительных параметров расчета механических свойств проката приведено на рис. 5, а результаты расчета – на рис. 6.

Таким образом, разработано комплексное программное обеспечения, позволяющее при прогнозировании механических свойств готового проката учитывать влияние конструктивных особенностей прокатных станов и особенностей режимов прокатки.

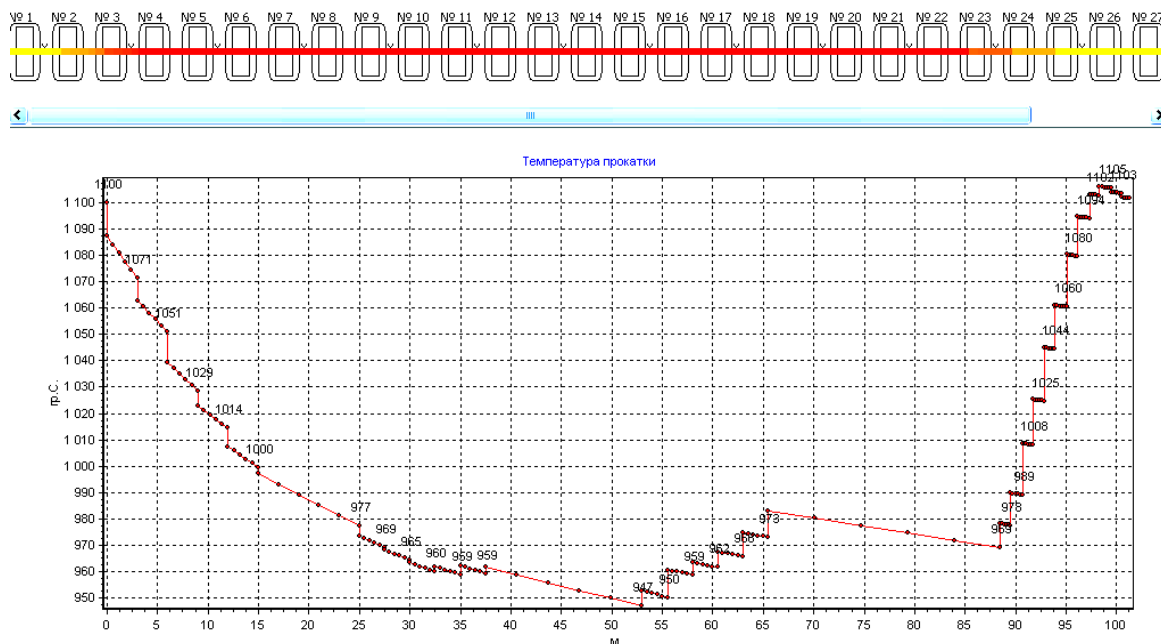


Рис. 3. Расчетная температура проката

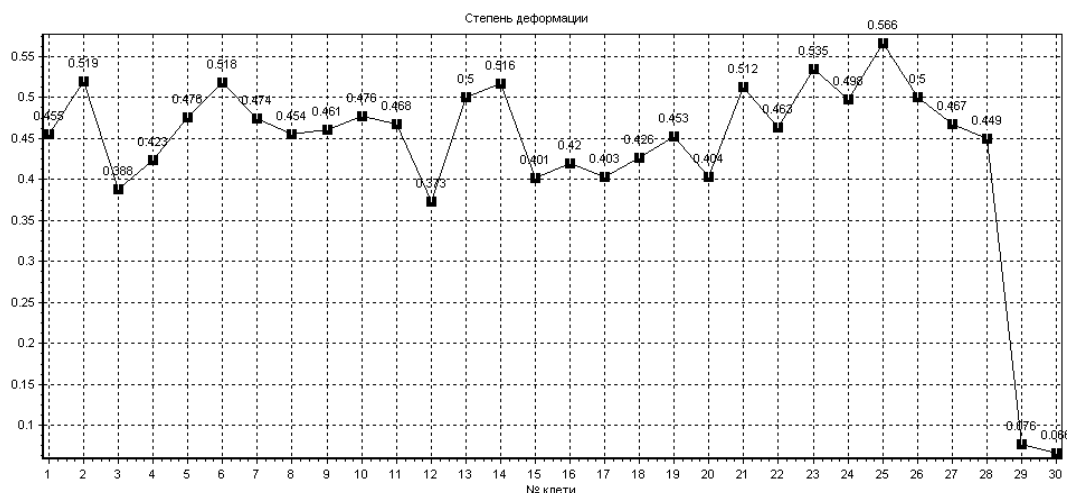


Рис. 4. Расчетная накопленная степень деформации

Задачи исследования – оценка возможности производства катанки сварочного назначения диаметром 5,5 мм из стали марки Св-10НМА, изготовляемой из непрерывнолитых заготовок сечением 125 × 125 мм в условиях современного высокоскоростного проволочного стана 150 Белорусского металлургического завода с использованием разработанной комплексной математической модели процесса непрерывной прокатки и прогнозирования структуры и механических свойств для получения заданного комплекса свойств в готовом прокате. С этой целью с помощью разработанной комплексной математической модели процесса непрерывной прокатки и прогнозирования свойств провели вычислительный эксперимент по определению энергосиловых параметров прокатки при производстве диаметром 5,5 мм из стали марки Св-10НМА, получаемой из заготовок сечением 125 × 125 мм. На основе расчета и анализа технологических параметров процесса прокатки и последующего охлаждения появляется возможность оптимизации конструктивно-структурного состава прокатного стана, режимов прокатки и последеформационной обработки с позиций обеспечения требуемого комплекса показателей качества производимой продукции, а также разрабатывать технологические режимы производства проката из новых марок стали.

**Параметры расчета механических свойств...**

Параметры стана | Хим. состав стали

Хим. состав, %

Углерод	0.170
Марганец	0.5
Кремний	0.10
Никель	0.020
Хром	0.050
Медь	0.040
Молибден	0.000
Титан	0.000
Алюминий	0.000
Фосфор	0.012
Азот	0.007

Задать из параметров марки

OK Cancel

---

**Параметры расчета механических свойств...**

Параметры стана | Хим. состав стали

Параметры проката

Радиус проката, мм.: 2.8

Температура, С: 1101.3

Степень деформации: 0.07

Зона ускоренного охлаждения

Длина, м.: 40

Вид охлаждения: вода

Скорость, м/с: 110.0

Козф. коррекции: 1

Линия Stelmor

Количество зон: 2

Скорость перемещения, м/с: 0.4

Зона	Длина, м.	Козф. коррекции
1	40	0.7
2	80	0.7

OK Cancel

Рис. 5. Окна ввода дополнительных параметров для расчета механических свойств готового проката

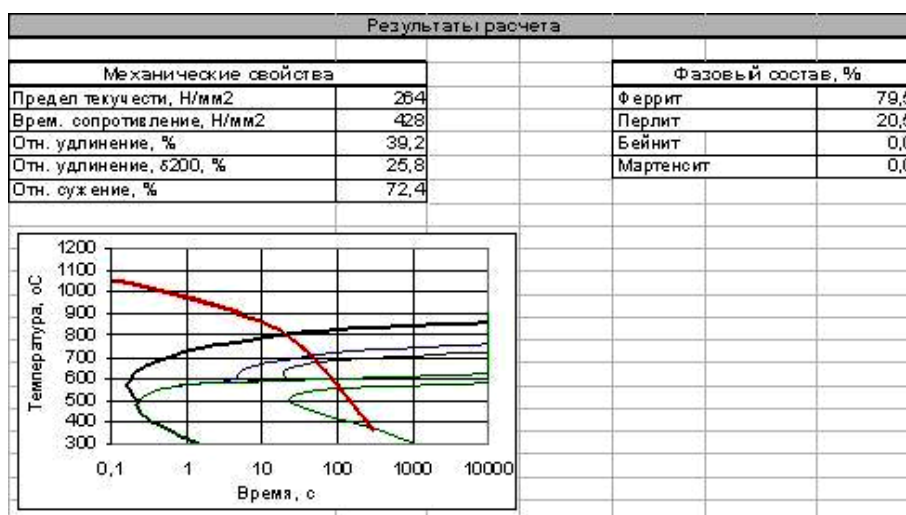


Рис. 6. Результаты расчета фазового состава и механических свойств готового проката

Согласно заводской технологии скорость прокатки указанного профиля составляет 110 м/с, температура конца прокатки (на выходе из последней чистой клетки стана) порядка 1050 °С. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Из анализа табл. 1 видно, что усилие прокатки в 25 и 26 рабочих клетях проволочного блока превышает допустимые их технической характеристикой значения. В то же время значения момента и мощности прокатки находятся в пределах допустимых.

Поэтому для реализации процесса высокоскоростной прокатки катанки диаметром 5,5 мм из заготовки сечением 125 × 125 мм необходимо либо перераспределение обжатий по клетям стана, либо изменение существующего температурно-скоростного режима прокатки.

В табл. 2 представлены результаты расчета энергосиловых параметров процесса прокатки такого проката, получаемого из заготовок сечением 125 × 125 мм после изменения режима обжатий в перегруженных клетях стана.

Из анализа табл. 2 видно, что после изменения режима обжатий в перегруженных клетях и переноса части деформации в другие клетки ограничения были устранены.

Таким образом, изменение режима обжатий позволяет производить указанную катанку диаметром 5,5 мм из стали марки Св-10НМА оптимального химического состава,

получаемую из заготовок сечением  $125 \times 125$  мм с сохранением существующего на стане температурно-скоростного режима прокатки и не требует изменения конструктивно-структурного состава проволочного стана.

Таблица 1

Результаты расчета энергосиловых параметров процесса прокатки катанки диаметром 5,5 мм из заготовок сечением  $125 \times 125$  мм стали Св-10НМА в условиях современного высокоскоростного проволочного стана 150 БМЗ

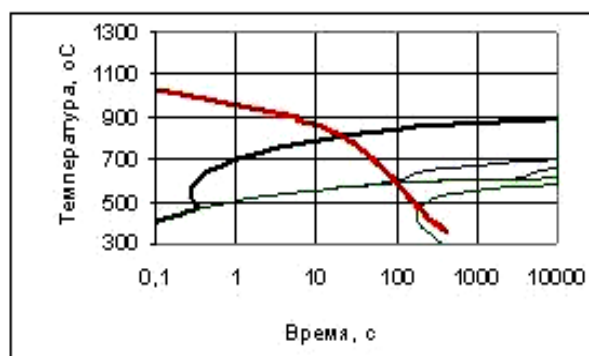
№ клетки	P, кН	M, кН·м	N, кВт	P <sub>max</sub> , кН	M <sub>max</sub> , кН·м	N <sub>max</sub> , кВт
1	1002,7	74,2	66,79	1181	130	400
2	844,7	64,8	83,87	1222	152	400
3	773,3	45,7	70,50	1496	144	400
4	556,5	32,5	81,62	945	89	400
5	693,4	34,9	105,06	1298	101	600
6	471,4	26,8	107,91	963	87	600
7	526,8	23,7	121,37	1008	87	600
8	306,7	15,0	100,63	1008	87	600
9	361,2	13,5	125,37	700	87	600
10	220,4	9,3	105,53	700	87	600
11	283,0	9,6	138,54	700	87	600
12	133,7	4,7	85,21	700	87	600
13	221,2	6,6	150,07	342	87	600
14	132,7	4,4	136,44	342	87	600
15	155,1	3,9	140,20	342	87	600
16	95,7	2,6	115,44	342	87	600
17	121,0	2,2	181,13	197	4,48	1100
18	77,1	1,6	158,06	149	3,95	1100
19	91,7	1,5	193,24	181	3,92	1800
20	68,5	1,2	190,79	128	2,24	1800
21	87,6	1,1	303,82	119	2,22	1800
22	52,5	0,7	245,21	76,5	1,51	1800
23	70,6	0,8	340,85	87,6	1,42	1800
24	40,7	0,5	270,91	54,6	0,96	1800
25	70,4	0,6	379,81	67,9	0,98	1800
26	45,2	0,3	288,37	42,1	0,68	1800
27	34,6	0,4	262,03	40	0,5	3200
28	14,0	0,4	140,00	40	0,5	
29	7,9	0,2	45,26	35	0,4	
30	6,1	0,2	34,04	35	0,4	

С использованием разработанных математических моделей определены рациональные режимы последеформационного охлаждения катанки из стали марки Св-10НМА в линии «Stelmor». Рассчитанные термокинетические диаграммы для этой марки стали приведены на рис. 7. Выполненные прогнозные расчеты структуры и механических свойств катанки показали следующее. Временное сопротивление разрыву  $510\text{--}550 \text{ Н/мм}^2$  обеспечивается в случае содержания химических элементов в стали на минимальном уровне – при средней скорости охлаждения в интервале температур фазовых превращений  $1,5\text{--}2,0 \text{ }^\circ\text{C/с}$ . В случае содержания химических элементов на среднем уровне –  $1,1\text{--}1,2 \text{ }^\circ\text{C/с}$ , а на максимальном уровне –  $0,80\text{--}0,85 \text{ }^\circ\text{C/с}$ . При этом относительное сужение составляет  $72\text{--}81 \%$ . Структура проката состоит из феррита и бейнита.

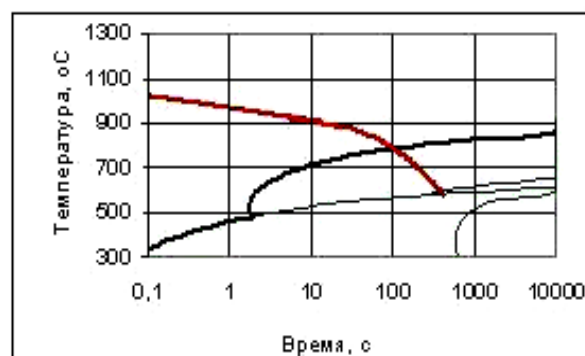
Таблица 2

Результаты расчета энергосиловых параметров процесса прокатки катанки диаметром 5,5 мм из заготовок сечением 125 × 125 мм стали Св-10НМА после изменения режима обжатий в линии проволочного стана 150 БМЗ

№ клетки	P, кН	M, кН·м	N, кВт	P <sub>max</sub> , кН	M <sub>max</sub> , кН·м	N <sub>max</sub> , кВт
1	1002,7	74,2	66,79	1181	130	400
2	844,7	64,8	83,87	1222	152	400
3	773,3	45,7	70,50	1496	144	400
4	556,5	32,5	81,62	945	89	400
5	693,4	34,9	105,06	1298	101	600
6	471,4	26,8	107,91	963	87	600
7	526,8	23,7	121,37	1008	87	600
8	306,7	15,0	100,63	1008	87	600
9	361,2	13,5	125,37	700	87	600
10	220,4	9,3	105,53	700	87	600
11	283,0	9,6	138,54	700	87	600
12	133,7	4,7	85,21	700	87	600
13	221,2	6,6	150,07	342	87	600
14	132,7	4,4	136,44	342	87	600
15	155,1	3,9	140,20	342	87	600
16	95,7	2,6	115,44	342	87	600
17	121,0	2,2	181,13	197	4,48	1100
18	77,1	1,6	158,06	149	3,95	1100
19	91,7	1,5	193,24	181	3,92	1800
20	68,5	1,2	190,79	128	2,24	1800
21	87,6	1,1	303,82	119	2,22	1800
22	52,5	0,7	285,24	76,5	1,51	1800
23	80,4	1,0	410,15	87,6	1,42	1800
24	49,8	0,6	328,43	54,6	0,96	1800
25	56,4	0,5	349,51	67,9	0,98	1800
26	30,2	0,2	218,25	42,1	0,68	1800
27	34,6	0,4	262,03	40	0,5	3200
28	14,0	0,4	140,00	40	0,5	
29	7,9	0,2	45,26	35	0,4	
30	6,1	0,2	34,04	35	0,4	



а



б

Рис. 7. Рассчитанные термокинетические диаграммы стали Св-10НМА при содержании химических элементов на минимальном уровне (а) и максимальном уровне (б)

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили результаты моделирования. Фактические значения механических свойств составили: временное сопротивление разрыву 510–530 Н/мм<sup>2</sup>, относительное сужение – 65–80 %.

### ВЫВОДЫ

В Институте черной металлургии НАН Украины разработано комплексное программное обеспечение (ПО), позволяющее рассчитывать и анализировать температурные, деформационные, скоростные, энергосиловые параметры процесса прокатки и прогнозировать фазовый состав и механические свойства готового проката.

С использованием разработанных математических моделей определены рациональные режимы последеформационного охлаждения катанки из выбранной стали марки Св-10НМА оптимального состава в линии «Stelmog». Выполненные прогнозные расчеты структуры и механических свойств катанки показали, что заданные значения временного сопротивления разрыву 510–550 Н/мм<sup>2</sup> обеспечиваются в случае содержания химических элементов в стали на минимальном уровне – при средней скорости охлаждения в интервале температур фазовых превращений 1,5–2,0 °С/с, а на максимальном уровне – 0,80–0,85 °С/с. При этом показатели относительного сужения составляют 72–81 %.

В результате проведенного вычислительного эксперимента установлено, что при производстве катанки диаметром 5,5 мм усилие прокатки в рабочих клетях № 25 и № 26 превышает допустимые их технической характеристикой значения. В то же время значения момента и мощности прокатки находятся в пределах допустимых. Предложено снизить усилия прокатки в этих клетях путем перераспределения обжатий по клетям стана.

Таким образом, изменение режима обжатий позволяет производить указанную катанку диаметром 5,5 мм из низкоуглеродистой легированной стали марки Св-10НМА сварочно-го назначения с оптимальным содержанием химических элементов, получаемой из заготовок сечением 125 × 125 мм с сохранением существующего на современном высокоскоростном проволочном стане 150 БМЗ температурно-скоростного режима прокатки и не требует изменения конструктивно-структурного состава стана.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Жучков С. М. Концепция модернизации проволочных станов / С. М. Жучков // *Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. Металургія.* – Донецк : ДонНТУ, 2008. – Вып. 10. – С. 279–286.
2. Теоретические и технологические основы высокоскоростной прокатки катанки // А. А. Горбачев, С. М. Жучков, В. В. Филиппов [и др.] – Минск : Высшая школа, 2003. – 287 с.
3. Соснин С. В. Комплексная математическая модель и система для проектирования технологии производства сортового проката с заданными показателями качества / С. В. Соснин, В. А. Трусов // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 2006. – № 9. – С. 21–24.
4. *Simulation of Material Flow, Microstructure and Properties Evolution in Bar and Wire Rolling* / G. Krause, R. Kawalla, L. Chabbi [et al.] // *Steel Research International.* – 2007. – № 10, 11. – P. 745–750.
5. Трусов В. А. Моделирование процессов при производстве сортовых профилей с заданными показателями качества / В. А. Трусов, В. А. Осадчий, И. В. Смарицина, С. В. Соснин // *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 8. Пластична деформація металів.* – Дніпропетровськ : «Системні технології», 2005. – С. 106–110.
6. Миленин А. А. Применение расчетно-экспериментального подхода для оптимизации процесса регулируемой прокатки прутков / А. А. Миленин, К. Лабер // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. праць* – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 357–362.

Раздобреев В. Г. – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник ИЧМ НАН Украины;  
Воробей С. А. – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник ИЧМ НАН Украины;  
Паламарь Д. Г. – мл. науч. сотрудник ИЧМ НАН Украины;  
Иванов А. П. – вед. инженер ИЧМ НАН Украины.

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

E-mail: office.isi@nas.gov.ua