

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-45-55

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОЛОГИИ УЛУЧШЕНИЯ ЛИСТОПРОКАТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Румянцев М.И.

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

Аннотация

Актуальность работы: для черной металлургии Российской Федерации важное значение имеет задача внедрения технологий, которые позволят повысить эффективность существующих производств и конкурентоспособность выпускаемой продукции, а также освоить производство современных видов металлопроката. В связи с потребностью в ускоренном выполнении и реализации соответствующих разработок актуальна проблема выявления и внедрения методов, которые минимизируют время поиска рационального комплексного решения при достаточно высокой его достоверности. **Цель работы:** в статье представлены результаты исследований, выполненных с целью развития методов для оперативной разработки режимов прокатки, а также создания и совершенствования средств математического моделирования и оценивания результативности технологических процессов и операций листопрокатного производства с целью улучшения эффективности листопрокатных технологических систем за счет расширения сортамента, улучшения качества продукции, ресурсо- и энергосбережения. **Используемые методы:** при выполнении исследований применялись теория систем, математическое и компьютерное моделирование; статистические методы анализа, а также контроля и управления качеством продукции; наблюдения за объектами листопрокатного производства с целью изучения и обобщения опыта их функционирования; производство экспериментальных партий проката. **Новизна:** одним из результатов исследования является универсальный алгоритм и метод автоматизированного проектирования режима прокатки. Также разработаны математические модели горячей и холодной прокатки стальных листов и полос разнообразного назначения на станах различных типов. При создании компонентов математического обеспечения был разработан и применен метод построения аккомодационных моделей. С целью повышения надежности и объективности выводов рекомендован и адаптирован метод оценки соответствия характеристик как технологического процесса, так и качества продукции. **Практическая значимость:** обобщенный алгоритм автоматизированного проектирования реализован в виде компьютерных программ автоматизированного проектирования режимов прокатки на листопрокатных станах различных типов. С применением этих программ, в сочетании с методом оценки соответствия, получены технологические решения, направленные как на совершенствование производства выпускаемой продукции, так и на освоение новых видов листового проката (например, из HSLA-стали).

Ключевые слова: листовой прокат, технологическая система, технологический процесс, режим прокатки, обобщенный алгоритм автоматизированного проектирования режимов прокатки, конструирование моделей, аккомодационная модель, качество продукции, результативность процесса, статистическое оценивание, момент прокатки толстых листов, режим деформации на широкополосном стане горячей прокатки, горячекатаный прокат из HSLA-стали.

Введение

В стратегии развития отечественной черной металлургии на период 2012–2030 гг. [1] сформулированы задачи совершенствования сортамента продукции, повышения требований к ее служебным характеристикам и конкурентоспо-

собности. Также указывается на необходимость роста импортозамещения и поставок на экспорт продукции с увеличением глубины переработки. При этом прогнозируется рост доли листового проката от 43,7% в 2014 г. до 46,9–53,4% в 2030 г. Для достижения указанных целей предусмотрено как совершенствование технологий и пуск новых агрегатов на существую-

© Румянцев М.И., 2017

щих предприятиях, так и строительство новых заводов, т.е. совершенствование действующих и создание новых технологических систем (ТС).

Основополагающее определение ТС было введено применительно к машиностроительной отрасли [2]. Возможность подхода с таких позиций к производству проката впервые успешно реализована В.С. Зайцевым в разработанной им методологии проектирования прокатных цехов [3]. Здесь прокатный цех рассматривается как система, в которой осуществляется производственный процесс превращения ресурсов (физических, технических и трудовых) в готовую продукцию (прокат), предусмотренную его производственной программой. Такой подход получил развитие в работах В.Ф. Рашникова при решении задач повышения эффективности прокатного производства ОАО «ММК» [4]. При этом естественным образом предметом исследования становятся не только производственные процессы отдельных прокатных цехов, но и взаимосвязи результатов этих процессов в технологической последовательности их осуществления (в технологическом маршруте) как существенные факторы достижения цели функционирования системы в целом.

С таких позиций листопрокатную технологическую систему (ЛПТС) рассматриваем как совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов или операций с целью получения листового проката заданного качества в требуемом количестве. Выделили следующие задачи улучшения ЛПТС:

- Совершенствование режимов прокатки выпускаемой продукции и разработки режимов прокатки новых видов проката.
- Повышение достоверности и объективности оценок результативности технологических процессов
- Подготовка высококвалифицированных исполнителей.

В.Н. Заверюха указал на два основных принципа улучшения системы: эволюции (лучшие системы возникают улучшением предыдущих) и характеристики (улучшение системы есть изменение множеств, ее характеризующих). При этом выделяются 5 групп

методов. К первой относятся методы оптимизации, которые изменяют только множество значений состояний элементов системы. Другие четыре группы составляют методы улучшения системы путем развития, т.е. за счет изменения иных множеств: элементов; состояний элементов; преобразований одних состояний элементов в другие; воздействий элементов друг на друга [5].

Любой метод улучшения системы должен быть нацелен на поиск решения, которое является если не оптимальным, то рациональным, что требует рассматривать несколько вариантов и выбирать наиболее приемлемый из них на основании определенного критерия. В указанных аспектах проявляется объективно существующая аналогия между поиском решения, направленного на улучшение ТС, и процессом проектирования, в котором на любом уровне декомпозиции объекта реализуется единый алгоритм, включающий процедуры синтеза и анализа [6–7]. С учетом усиления потребностей практики в ускорении поиска и реализации новых эффективных разработок, методы синтеза и анализа должны минимизировать время поиска рационального решения при достаточно высокой его достоверности.

Метод совершенствования режимов прокатки выпускаемой продукции и разработки режимов прокатки новых видов проката

Задача разработки режима прокатки имеет важное значение как при создании и совершенствовании технологий, так и при оценивании возможностей оборудования для выпуска новых видов листового проката и наиболее эффективно решается с применением автоматизированного проектирования. Как объект проектирования режим прокатки есть совокупность конкретных значений тех параметров системы, ее реализующей, регламентация которых обеспечивает достижение цели прокатки – при заданном расходе ресурсов получить прокат заданного качества в заданном количестве. Такая концепция отображает возможность влиять на достижение цели прокатки не только деформационными, скоростными, температурными параметрами и натяжением, но также исходным состоянием полосы и некоторыми

параметрами обрабатывающей подсистемы (например, профилировками и состоянием поверхности рабочих валков, свойствами технологической смазки и т.д.) [8].

С точки зрения алгоритмизации, задача проектирования режима прокатки рассматривается инвариантно по отношению к виду прокатываемого профиля. Особенности, присущие прокатке профилей конкретного вида, отображаются, прежде всего, в математических моделях и в комплексе ограничений, используемых в том или ином случае. Исходя из обобщенного алгоритма проектирования [6] и сформулированной концепции режима прокатки как объекта проектирования, разработаны инвариантный (обобщенный) алгоритм (рис. 1) и структура программы автоматизированного проектирования режимов прокатки. Отображаемая ими информационная система обладает большей общностью и может быть

реализована для решения задач разработки режимов прокатки профилей любого вида на любом стане.

Особенности процесса получения проката различных видов и применяемого оборудования (обрабатывающей системы) учитываются в специальном математическом обеспечении, которое необходимо не только для реализации процедур 9 и 10, но и для описания первого приближения режимов прокатки, которое синтезируется в начале проектирования последовательным исполнением процедур 4–8 (см. рис. 1). Так как точность первого приближения в значительной мере определяет и точность окончательного решения [6], является актуальной задача разработки на основании имеющегося опыта формализованных рекомендаций по выбору начальных значений параметров, характеризующих режим прокатки – суммарной и частных деформаций, скоростей прокатки, натяжений (если они используются) и т.д.

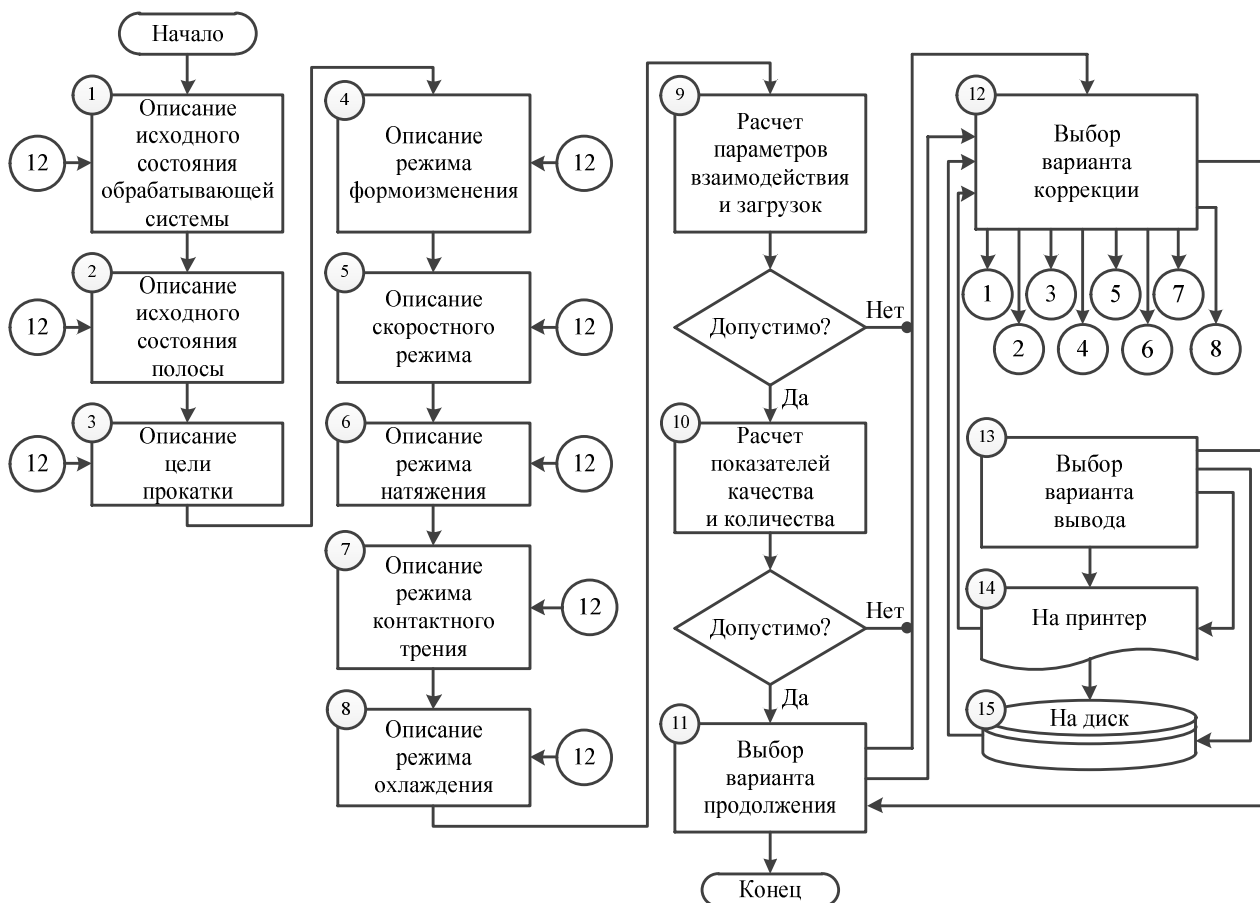


Рис. 1. Обобщенный алгоритм автоматизированного проектирования режимов прокатки

Развитие специального математического обеспечения для автоматизированного проектирования режимов прокатки

При разработке математического обеспечения для расчета параметров взаимодействия и нагрузок в системе «рабочая клеть-полоса» применяли метод конструирования моделей на основе известных теоретических решений с уточнением как отдельных формул, так и областей их применения.

Например, с целью отображения непостоянства сопротивления деформации прокатываемого металла в связи с вариациями плавочного химсостава, а также для разработки режимов прокатки марок стали, особенности сопротивления деформации которых еще не известны, разработаны модели прогноза предела текучести стали с произвольной химической композицией. Применительно к горячей прокатке за основу модели выбрана методика Андреюка-Тюленева, которая учитывает одновременное влияние 13 химических элементов и поэтому является более общей, чем распространенные за рубежом формулы S. Shida, F. Siciliano, R. Bruna, а также частные модификации формулы Y. Misaka [9–10]. Дополнение формулы Андреюка-Тюленева коэффициентом влияния фазового превращения и коэффициентом коррекции по степени и скорости деформации позволило понизить нижнюю границу доверительного интервала прогнозирования по температуре с 800 до 700°C и повысить верхнюю границу доверительного интервала по обжатиям с 30 до 55% [11].

Известные теоретические решения в связи с уточненными областями их применения интегрированы в аккомодационные модели, каждая из которых отображает одно свойство моделируемой системы несколькими известными соотношениями, а алгоритм модели предусматривает выбор одного из них в зависимости от особенностей граничных условий. Наибольшая точность прогнозирования достигается, если выбор осуществляется в зависимости от значений существенных факторов [12].

Такой вывод подтверждается также опытом построения и применения аккомодационной модели момента прокатки крупногабаритных листов*. И в отечественной (например, [13]) и в зарубежной (например, [14]) практике наиболее распространены модели, в которых момент прокатки $M_{пр}$ связан с усилием прокатки P через ко-

* Совместно с инженером И.А. Разгулиным и канд. техн. наук Д.Н. Чикишевым.

эффициент плеча ψ . Используя результаты наблюдений при прокатке на стане 5000 раскатов толщиной 12,0–25,4 мм и шириной 2620–4500 мм из сталей СтЗсп, 15ХСНДА, К65 и Х65 сравнили значения ψ , рассчитанные по тринадцати различным формулам, представленным в работе [13], с фактическими значениями $\psi = M_{пр} / \left[2P \sqrt{R(h_0 - h_1)} \right]$, где R – радиус валков; h_0 и h_1 – толщины раската до и после прохода. Указанные значения, а также $M_{пр}$ и P принимали по отчетам АСУ ТП стана. Стан 5000 одноклетьевого, но прокатка производится в две стадии. Для черновой стадии характерно нарастание относительных обжатий по проходам, а на чистовой относительные обжатия от первого прохода к последнему снижаются. Существенным фактором коэффициента плеча является характеристика высоты очага деформации $m = l_x / h_{ср} = 2 \sqrt{R(h_0 - h_1)} / (h_0 + h_1)$, которая изменяется в пределах 0,36–1,72 на черновой стадии и 1,28–2,89 на чистовой. На каждой стадии с увеличением m значения ψ уменьшаются (рис. 2, а): от 0,65 до 0,47 при черновой прокатке и от 0,57 до 0,43 при чистовой. Для случаев $m < 1,4$ наименьшую погрешность дает формула, полученная Д.И. Суяровым и Ф.С. Гилевичем: $\psi = 0,4915 + 0,518m - 0,7068m^2 + 0,258m^3 - 0,02m^4$. В диапазоне от 1,4 включительно до 2 предпочтительно использовать формулу З. Вусатовского $\psi = h_1 / (2\Delta h) \ln(h_0 / h_1)$, а для случаев, когда $m \geq 2$, можно применять формулу М.М. Сафьяна и В.И. Мелешко $\psi = 0,498 - 0,0283m$. Степень соответствия момента прокатки, рассчитанного с учетом высказанных рекомендаций, и фактического момента достигает практически 99% (рис. 2, б).

Первые приближения режимов прокатки синтезированы с применением статистического анализа и аппроксимации закономерностей, наблюдаемых на практике. Например, для черновой группы широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП), где металл обжимается от толщины сляба $H_{сл}$ до толщины промежуточного раската h_p , из предположения линейного распределения коэффициентов обжатия $\eta_{Ri} = h_{0,i} / h_{1,i}$ по черновым проходам ($i=1, \dots, N_R$) получили [8]

$$\eta_{Ri} = \eta_{R1} + 2(i-1) \frac{\sqrt[N_R]{H_{сл}/h_p} - \eta_{R1}}{N_R - 1} \quad (1)$$

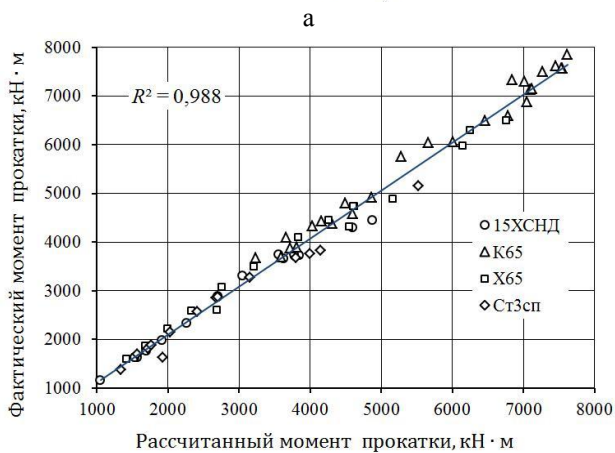
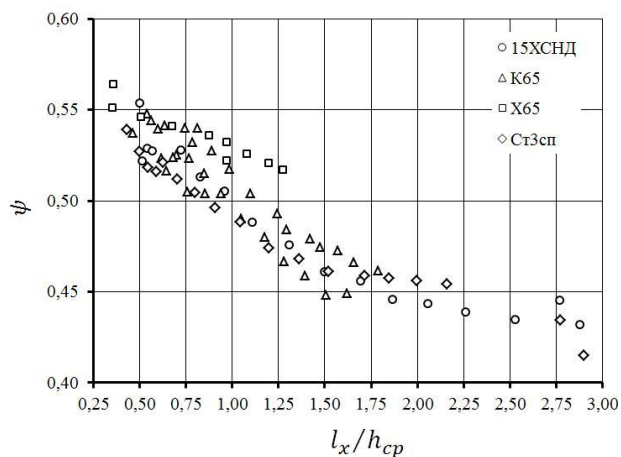


Рис. 2. Влияние высоты очага деформации на коэффициент плеча при прокатке толстых листов (а) и диаграмма соответствия рассчитанного и фактического момента прокатки (б)

Статистический анализ показал, что величина коэффициента обжатия в первом проходе, где сляб толщиной $H_{сл}$ обжимается на величину Δh_{R1} , $\eta_{R1} = H_{сл} / (H_{сл} - \Delta h_{R1})$ зависит от стратегии черновой прокатки. Так, при прокатке относительно мягких марок стали (σ_0 не более 85 МПа) а также узких раскатов характерно, что в первой клетке применяется пониженное абсолютное обжатие $\Delta h_{R1} \approx 0,135 \cdot H_{сл}$. При прокатке прочных марок стали ($\sigma_0 > 85$ МПа), а также при прокатке широких раскатов в первой клетке производится наибольшее абсолютное обжатие и его величина $\Delta h_{R1} \approx 0,037 \cdot D_p$.

Первое приближение рациональной толщины промежуточного раската h_p необходимо выбирать при заданной толщине полосы h_k , исходя из коэффициента суммарного обжатия в чистовой группе $\eta_{\Sigma F} = h_p / h_k$, значение которого определяется с применением множественной аппроксимации

$$\eta_{\Sigma F} = c_0 \cdot \sigma_0^{c_1} \cdot (b_k / L_p)^{c_2} \cdot (b_k / h_k)^{c_3} \quad (2)$$

где c_0, c_1, c_2, c_3 зависят от числа активных чистовых клеток N_F (табл. 1). Для выбора N_F разработан алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 3.

Таблица 1
Коэффициенты аппроксимации (2)

N_F	c_0	c_1	c_2	c_3
5	0,0038	0,4814	-0,9103	0,8713
6	0,0303	-0,0498	-0,9896	0,9158
7	0,0925	-0,356	-1,0277	0,9632

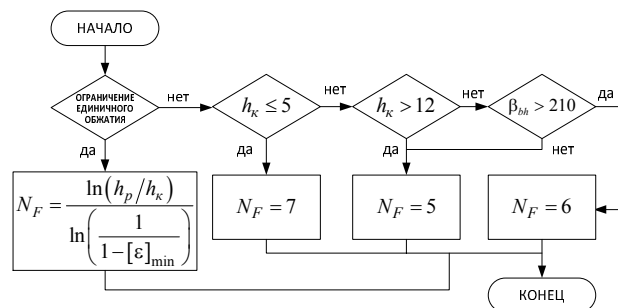


Рис. 3. Алгоритм выбора числа клеток для прокатки в чистовой группе ШСГП

Если технология предусматривает, что чистовая прокатка должна производиться с относительными обжатиями не менее чем $[\epsilon]_{\min}$, выбор числа активных клеток производится по известному соотношению между числом проходов и характеристиками суммарной и средней деформации $N_F = \ln \eta_{\Sigma F} / \ln \bar{\eta}_F$, где $\bar{\eta}_F = 1 / (1 - [\epsilon]_{\min})$ – коэффициент среднего обжатия. Если же прокатка производится без регламентации минимальной степени деформации за проход, N_F определяется следующим образом. Полосы толщиной не более 5 мм необходимо прокатывать в семи чистовых клетях, а при толщине более 12 мм использовать пять клеток. Если должна быть прокатана полоса толщиной от 5 до 12 мм, то критерием для выбора числа клеток является отношение $\beta_{bh} = b_k / h_k$. При $\beta_{bh} > 210$ используется шесть чистовых клеток, а в противном случае – пять.

Для синтеза режима обжатий в чистовой группе ШСГП применяется формула Имаи $h_{li} = h_p h_k / \sqrt{im \beta_{wi} h_p^{im} + (1 - \beta_{wi}) h_k^{im}}$, где $im = 0,30 + 0,21 / h_k$; β_{wi} – коэффициенты использования мощности главных приводов. Чтобы повысить обоснованность режимов обжатий, получае-

мых на основе формулы Имаи с учетом отчетливо выраженных особенностей режимов деформации при различном числе активных чистовых клетей, были исследованы распределения коэффициентов (табл. 2).

В совокупности изложенные подходы позволили обеспечить достаточно высокую степень соответствия прогнозируемых и действительных абсолютных обжатий как в черновых (рис. 4, а), так и в чистовых (рис. 4, б–в) клетях.

Таблица 2

Типовые распределения коэффициентов загрузки приводов чистовых клетей ШСГП при прокатке полос различной толщины

Вариант	Толщина полосы, мм	N_F	Клеть						
			F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
1	1,2–2,5	7	0,19	0,32	0,52	0,67	0,81	0,92	1,00
2	2,6–5,0	7	0,17	0,34	0,49	0,65	0,78	0,89	1,00
3	5,1–8,0	6	0,19	0,35	0,52	0,68	0,84	1,00	–
4	8,1–12,0	6	0,16	0,30	0,47	0,62	0,80	1,00	–
5	8,1–12,0	5	0,18	0,36	0,57	0,75	1,00	–	–
6	Св. 12,1	5	0,17	0,33	0,52	0,71	1,00	–	–

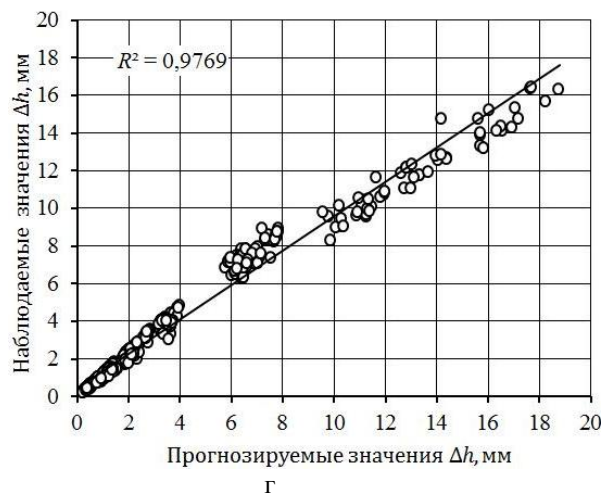
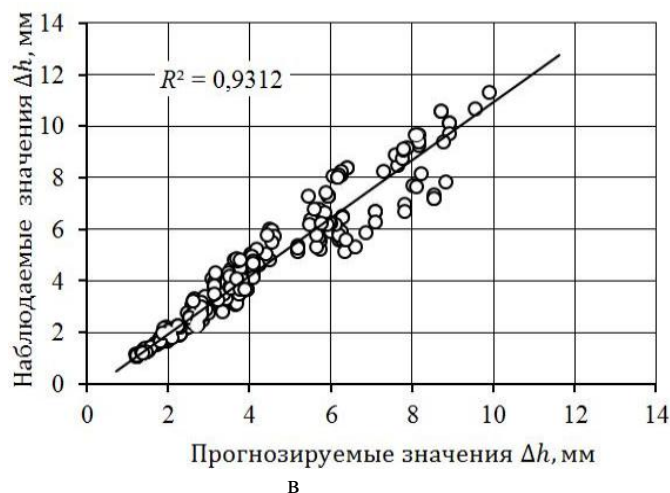
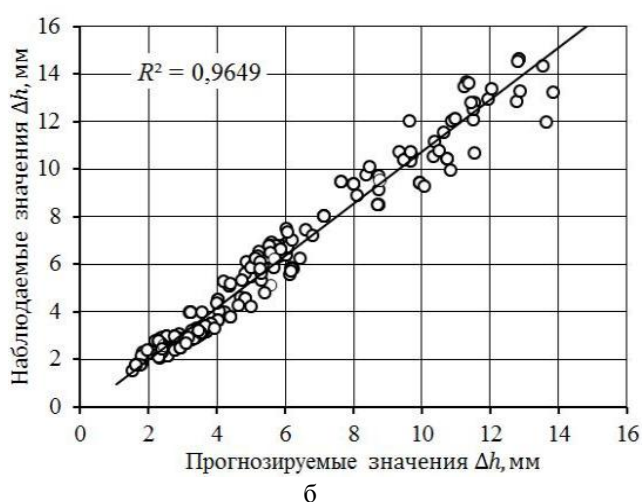
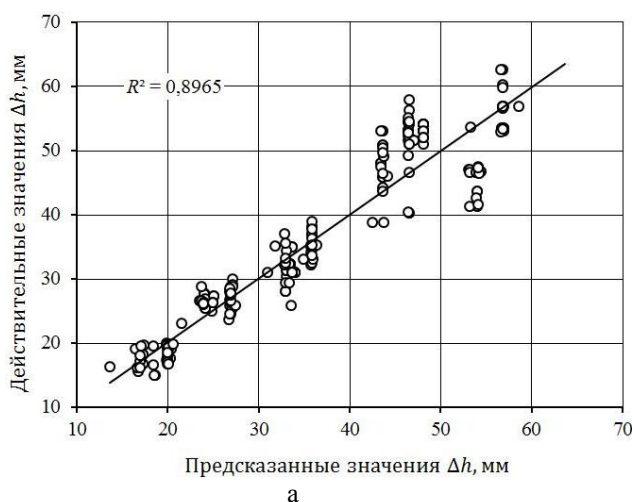


Рис. 4. Диаграммы соответствия прогнозируемых и наблюдавшихся абсолютных обжатий при прокатке в черновых (а) и чистовых (б–г) клетях при $N_F=5$ (б), $N_F=6$ (в) и $N_F=7$ (г)

Метод повышения достоверности и объективности оценок результативности технологических процессов

В связи с неизбежностью изменчивости параметров ТС для повышения объективности и достоверности выводов относительно степени достижения целевых показателей необходимо использовать статистические методы и квалиметрическое оценивание. Методология квалиметрии [15] и методология статистического управления процессами (SPC – Statistical Process Control) [16] были разработаны достаточно давно. Известен положительный опыт их использования в производстве различной металлопродукции (например, [17–22]). Нами было предложено [23] применить концепцию статистического анализа возможностей процесса [24] к построению дифференциальных оценок качества продукции, которые назвали оценками (показателями) соответствия. В случае регламентации, например, характеристики качества только наибольшим допустимым значением USL (верхняя оценка соответствия)

$$q_{USL} = (USL - \bar{x}) / (3s). \quad (3)$$

а в случае регламентации только наименьшим допустимым значением LSL (нижняя оценка соответствия)

$$q_{LSL} = (\bar{x} - LSL) / (3s). \quad (4)$$

Если характеристика регламентирована наибольшим и наименьшим допустимыми значениями (двухсторонняя оценка соответствия)

$$q_{pk} = \min(q_{LSL}; q_{USL}). \quad (5)$$

В (3) и (4) $\bar{x} - LSL = \Delta_{LSL}$ и $USL - \bar{x} = \Delta_{USL}$ представляют собой допустимые интервалы варьирования оцениваемого параметра, а $3s$ – доля его фактической изменчивости, приходящаяся на допустимый интервал (рис. 5). Характеристиками фактической изменчивости и соответствующего ей центра рассеяния приняты стандартное отклонение S и выборочное среднее \bar{x} . Используются оценки результативности технологии «отличная», «хорошая» и «удовлетворительная», которым соответствуют значения показателей (3)–(5): более 1,67; 1,33–1,67 и 1,00–1,33. Чем выше q_{pk} , тем результативнее процесс.

Например, при разработке технологии производства микрولهгированного конструкционного горячекатанного проката для холодного деформирования со свойствами по DIN EN 10149-2 [25] применялись различные химические композиции стали и были получены следующие значе-

ния механических свойств: $\sigma_T = 320\text{--}600$ МПа, $\sigma_B = 390\text{--}660$ МПа и $\delta = 25\text{--}43\%$. Анализ соответствия свойств нормам для различных классов прочности показал следующее (рис. 6).

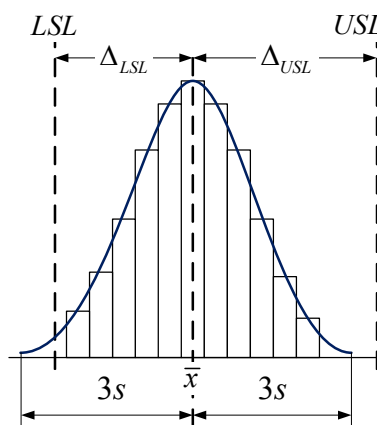


Рис. 5. К расчету показателя (оценки) соответствия при двустороннем ограничении параметра

При любой из рассмотренных химических композиций достигается высокое соответствие по относительному удлинению для всех групп прочности (рис. 6, в), а также по σ_T (рис. 6, а) и σ_B (рис. 6, б) для марок S315MC и S355MC. Для производства проката марки S420MC наиболее подходит химическая композиция VIII, при которой коэффициенты соответствия по σ_T и σ_B равны 2,31 (см. рис. 6, а) и 3,83 (см. рис. 6, б). Ни в одном из анализируемых случаев не обеспечивается получение проката классов прочности 460 и выше. Наиболее близки к характеристикам прочности, заданным в DIN EN 10149-2 применительно указанным классам, результаты прокатки металла с химической композицией IX. С увеличением толщины полосы достижение высокой прочности затрудняется (рис. 6, г).

Множественным регрессионным анализом построили аппроксимации зависимостей механических свойств от характеристик химического состава стали, параметров режима прокатки и толщины полос, с применением которых, используя инструмент «Поиск решения» MS EXCEL, нашли первые приближения рациональных химических композиций и ключевых контрольных характеристик получения проката S315MC-S500MC на ШСГП. Автоматизированное проектирование режимов прокатки показало возможность реализации найденных технологий, а результаты экспериментальных прокаток (табл. 3) обнаружили достаточно хорошее соответствие свойств опытных полос требованиям DIN EN 10149-2:1995 [26].

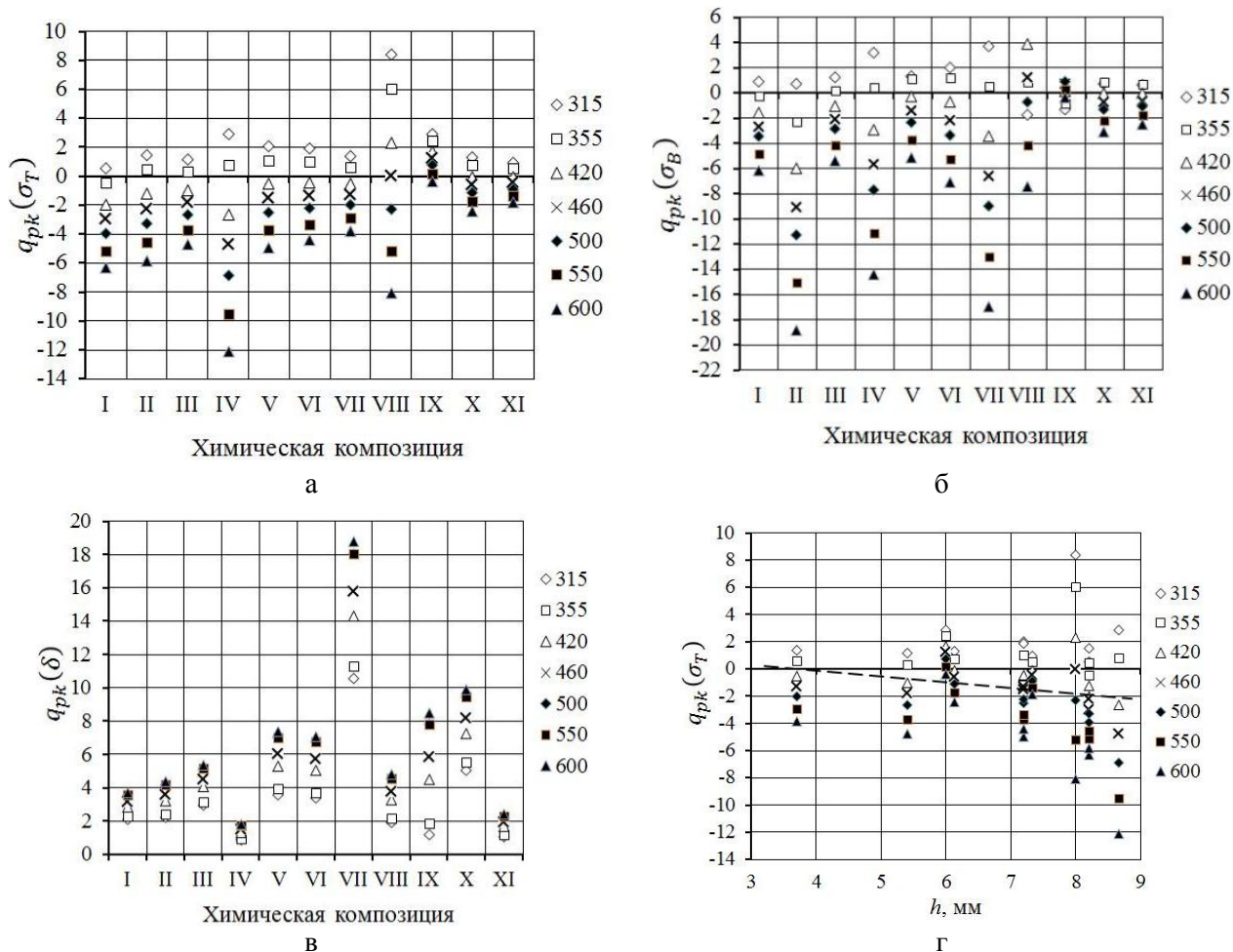


Рис. 6. Влияние химической композиции стали (а–в) и толщины полосы (г) на показатели соответствия свойств различным классам прочности

Таблица 3

Химический состав стали, температурный режим прокатки и оценки соответствия проката классов прочности S315MC-S500MC требованиям DIN EN 10149-2:1995

Марка стали	Содержание химических элементов, %							Температура, °С			Оценки соответствия свойств			
	C	Si	Mn	Al	V	Nb	Ti	$t_{Рк}$	$t_{кп}$	$t_{см}$	σ_T	σ_B	δ	KV^{20}
S315MC	0,07	–	0,45	0,04	–	0,025	–	1050–1080	840–860	590–630	1,54	1,66	1,57	–
S355MC	0,09	–	0,50	0,06	–	0,025	0,02	1030–1090	810–850	540–610	0,91	1,01	2,42	–
S420MC	0,07	0,25	1,1	0,05	–	0,065	–	1030–1090	820–850	560–620	1,94	7,02	0,74	–
S460MC	0,07	0,25	1,1	0,05	–	0,065	–	1060–1090	820–870	550–600	1,28	7,71	1,41	–
S500MC	0,08	0,34	1,5	–	0,03	0,075	0,018	1010–1050	820–860	550–590	1,17	1,09	2,40	2,23

Примечание. $t_{Рк}$ – температура конца черновой прокатки; $t_{кп}$ – температура конца чистовой прокатки; $t_{см}$ – температура смотки

Заключение

Разработан метод синтеза технологических решений, в основе которого лежит обобщенный алгоритм автоматизированного проектирования режимов прокатки профиля любого вида на стане произвольной структуры. Обобщенный алгоритм и его математическое обеспечение для отображения особенностей листовой прокатки реализованы в виде различных компьютерных программ автоматизированного проектирования, например [27–28].

Повышение объективности и достоверности выводов относительно степени достижения целевых показателей ЛПТС и ее элементов, как на стадии разработки, так и на стадии внедрения решений, достигается при дополнении методики улучшения методом оценивания соответствия прогнозируемых или фактических значений характеристик функционирования системы, в том числе показателей качества продукции, заданным требованиям с учетом прогнозируемой или фактической вариации целевых характеристик. Сочетание такого метода с автоматизированным проектированием способствует минимизации времени поиска рационального решения при достаточной высокой его достоверности.

С учетом полученных результатов составлены, обеспечены учебно-методическими изданиями (например, [29–31]) и реализуются рабочие программы профилирующих дисциплин по направлениям подготовки «Металлургия» для обучающихся по профилю «Обработка металлов и сплавов давлением» и «Стандартизация и метрология» для обучающихся по профилю «Стандартизация и сертификация». Разработаны и прочитаны специальные курсы в рамках сотрудничества с предприятиями черной металлургии по повышению квалификации персонала.

Значительная часть выполненных исследований соответствует тематике направления по созданию аппаратных средств, алгоритмического и программного обеспечения обработки информации для решения прикладных задач высокой сложности (п. а, п. 18) «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 № 988. Разработаны теоретические положения, а также научно обоснованные проектные и технологические решения, внедрение которых внесло значительный вклад в развитие экономики страны.

Список литературы

1. Об утверждении Стратегии развития черной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года и Стратегии развития цветной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года: Приказ Министерства промышленно-

2. стии и торговли РФ от 5 мая 2014 г. № 839. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70595824/> (дата обращения: 02.05.2015).
3. ГОСТ 14.004-83. Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий. М.: Стандартинформ, 2009. 9 с.
4. Зайцев В.С. Основы технологического проектирования прокатных цехов. М.: Металлургия, 1987. 336 с.
5. Рашников В.Ф. Развитие технологических систем на основе комплексного моделирования для производства конкурентоспособного стального проката: автореф. дис. ... д-ра техн. наук в форме научного доклада. Магнитогорск: МГМА, 1988. 56 с.
6. Заверюха В.Н. Развитие и применение методов исследования и методов улучшения листовой прокатки на основе системного подхода: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 1990. 442 с.
7. Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Машиностроение, 1980. 312 с.
8. Дитрих Я. Проектирование и конструирование: Системный подход: пер. с пол. М.: Мир, 1981. 456 с.
9. Румянцев М.И. Опыт развития и применения автоматизированного проектирования режимов горячей и холодной прокатки листовой стали разнообразного назначения на станах различных типов // Труды девятого конгресса прокатчиков, Череповец, 15–18 апреля 2013 г. Т. 2. Череповец: Череповец. гос. ун-т, 2013. С. 43–54.
10. Dimatteo A., Vannucci M. and Colla V. Prediction of Mean Flow Stress during Hot Strip Rolling Using Genetic Algorithms // ISIJ International, vol. 54 (2014), no. 1, pp. 171–178.
11. Recalculation of Flow Stresses from Industrial Process Data for Heavy Plate Rolling Using a 2D Finite Element Model / Erik Parteder, Klaus Zeman, Huiying Du, and Rainer Grill // Steel Research Int. 83 (2012), no. 2, pp. 124–130.
12. Rumyantsev M., Belov V., Razgulín I. Prediction model of the flow stress for the computer-aided design hot rolling sheet and strips pattern // METAL 2015 Conference proceedings. Ostrava: TANGER Ltd. 2015. P. 395–403.
13. Румянцев М.И. Аккомодационные модели – опыт построения и применения для анализа и совершенствования листовой прокатки // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 71-й межрегион. науч.-техн. конф. / под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. Т. 1. № 1. С. 153–156.
14. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки. Справочник. М.: Металлургия, 1986. 430 с.
15. Wusatowski Z. Fundamentals of Rolling. Pergamon Press Ltd., Printed in Poland. Katowice: «ŚLĄSK», 2012. 692 p.
16. Азгальдов Г.Г. Управление качеством и квалиметрия. Томск: Томск. политехн. ун-т, 2004.
17. Oakland J. S. Statistical Process Control. Fifth Edition. Bodmin: MPG Books Limited. 2003. 445 p.
18. Гун Г.С. Управление качеством высокоточных профилей. М.: Металлургия, 1984. 152 с.
19. Жадан В.Т., Маневич В.А. Совершенствование технологии прокатки на основе комплексных критериев качества. М.: Металлургия, 1989. 96 с.
20. Управление качеством продукции в технологиях метизного производства / А.Г. Корчунов, М.В. Чукин, Г.С. Гун, М.А. Полякова. М.: Издат. дом «Руда и металлы». 2012. 164 с.
21. Ganguly K. Improvement process for rolling mill through the dmaic six sigma approach // International Journal for Quality research. Vol 6, 2012, no. 3, pp. 221–231.
22. Noskievichova D., Kucharczyk R. Effective application of statistical process control (SPC) on the lengthwise onsure rolled plates process // Metalurgija. Vol. 51, 2012, no. 1, pp. 81–84.
23. Noskievichova D., Woska B. Design of methodology for application of statistical control on short run processes in metallurgy // Metalurgija. Vol. 53, 2014, no. 1, pp. 81–84.
24. Румянцев М.И., Цепкин А.С., Оплачко Т.В. Унифицированный подход к расчету дифференциальных оценок при квалимет-

- рическом оценивании качества проката // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 3. С. 61–64.
24. Montgomery D.C. Introduction to Statistical Quality Control. Sixth Edition. Jefferson City: John Wiley & Sons. Inc. 2009. 754 p.
 25. Практика освоения технологии производства в условиях ОАО «ММК» горячекатаных микролегированных высокопрочных сталей для автомобильной промышленности и строительства / С.В. Денисов, А.В. Горбунов, А.Г. Ветренко, М.А. Молостов, Э.М. Голубчик, Г.В. Щуров, М.И. Румянцев // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2009. С. 39–44.
 26. Разработка технологии и режимов прокатки высокопрочных сталей для автомобилестроения на широкополосном стане горячей прокатки / М.И. Румянцев, В.В. Галкин, А.В. Горбунов, А.Г. Ветренко, М. А. Молостов, А.О. Попов // Труды Восьмого конгресса прокатчиков, Магнитогорск, 11–15 октября 2010 г. Т. 1. Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 2010. С. 35–45.
 27. Разработка технологий горячей прокатки широкополосной стали разнообразного назначения на станах различных типов: Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. № 2013612426 от 27.02.2013 / М.И. Румянцев, А.В. Горбунов, А.О. Попов, А.Г. Ветренко, М.А. Молостов // ОБПБТ. 2013. №1.
 28. CR CAD: Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. № 2013611300 от 09.01.2013 / М.И. Румянцев, А.В. Горбунов, В.С. Митасов // ОБПБТ. 2013. № 5. Ч. 3. С. 982.
 29. Салганик В.М., Румянцев М. И. Технология производства листовой стали: учеб. пособие. М.: ФГУП НТЦ «Информрегистр», 2013; № гос. рег. 0321304908.
 30. Румянцев М. И., Ручинская Н. А. Статистические методы для обработки и анализа числовой информации, контроля и управления качеством продукции: учеб. пособие. М.: ФГУП НТЦ «Информрегистр», 2013; № гос. рег. 0321303451.
 31. Румянцев М. И., Локотунина Н. М., Моллер А.Б. Обработка металлов давлением и характеристики качества продукции: учеб. пособие. М.: ФГУП НТЦ «Информрегистр», 2013; № гос. рег. 0321303454.

Материал поступил в редакцию 17.08.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-45-55

SOME RESULTS OF THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF THE METHODOLOGY FOR ENHANCING STEEL SHEET PRODUCTION SYSTEMS

Mikhail I. Rummyantsev – Ph.D. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)-29-85-70. E-mail: mikhail.rummyantsev54@bk.ru; mir@magtu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0608-0446>

Abstract

Problem Statement (Relevance): One of the crucial challenges facing Russian iron-and-steel industry today includes the introduction of technologies that will enhance the efficiency of existing operations, make the products more competitive and help develop the production capacity for advanced rolled steel products. Due to the need to quickly find and implement solutions for the above, it is important to identify and adopt techniques that will help find a comprehensive solution in the shortest time and with a high degree of reliability. **Objectives:** This article describes the results of the research that sought to develop methods that would help create operating rolling schedules, create and enhance mathematical modeling tools and provide an enhanced tool for assessing the efficiency of processes and operations involved in the production of steel sheets. The expected benefits of the above include an expanded product assortment, improved quality and reduced resource costs. **Methods Applied:** The methods applied included systems theory, mathematical modeling and computer simulation; statistical methods of analysis and quality control; observation carried out at a number of rolling facilities; production of pilot lots. **Originality:** The results of the research include a genetic algorithm and a method for computer-aided design of rolling schedules. Mathematical models were developed for various hot and cold rolling mills producing steel sheets and strips meant for different applications. The method of building accommodation models was developed and applied for creating mathware components. To improve the reliability and objectivity of the conclusions the method of analyzing the compliance of the process and product quality was recommended and adjusted. **Practical Relevance:** The genetic algorithm of

computer-aided design is implemented as CAD software for creating rolling schedules for different types of rolling mills. The above software, together with the compliance assessment method, helped come up with the solutions intended to improve the existing production process and adopt new types of flat products (for example, HSLA steel products).

Keywords: Flat products, technological system, production process, rolling schedule, genetic algorithm of computer-aided design for creating rolling schedules, model building, accommodation model, product quality, process performance, statistical estimation, plate rolling, the reduction mode of a hot wide-strip mill, hot-rolled flat products from HSLA steel.

References

1. *Ob utverzhenii Strategii razvitiya chemoj metallurgii Rossii na 2015-2020 gody i na perspektivu do 2030 goda i Strategii razvitiya cvetnoj metallurgii Rossii na 2015-2020 gody na perspektivu do 2030 goda* [On approval of the Russian Iron and Steel Industry Development Strategy for 2014-2020 and for a longer term (up to 2030) and the Russian Non-Ferrous Industry Development Strategy for 2014-2020 years and for a longer term (up to 2030)]. Order by the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, no. 839, dated May 5, 2014. Available at: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70595824/> (Accessed: 02/05/2015).
2. *GOST 14.004-83. Tekhnologiya podgotovki proizvodstva. Terminy i opredeleniya osnovnykh ponyatij* [State standart 14.004-83. Production engineering. Terms and definitions of basic concepts]. Moscow: Standartinform Publ., 2009. 9 p. (In Russ.)
3. *Zajtsev V.S. Osnovy tekhnologicheskogo proektirovaniya prokatinikh tsehnov* [Fundamentals of rolling mill engineering]. Moscow: Metallurgiya, 1987. 336 p. (In Russ.)
4. *Rashnikov V.F. Razvitiie tekhnologicheskikh sistem na osnove kompleksnogo modelirovaniya dlya proizvodstva konkurentosposobnogo stalnogo prokata: avtoreferat dis. d-ra tekhn. nauk v*

- forme nauchnogo doklada [Developing simulation based production systems for competitive steel products. Extended abstract of D.Sc. dissertation presented in the form of a scientific paper]. Magnitogorsk: MGMA, 1988. 56 p. (In Russ.)
5. Zaveryukha V.N. *Razvitie i primeneniye metodov issledovaniya i metodov uluchsheniya listovoy prokatki na osnove sistemnogo podkhoda*: dis. d-ra tekhn. nauk [Development and application of research methods and techniques for improving steel sheets based on system approach]. D.Sc. (Eng.) dissertation. Magnitogorsk, 1990. 442 p. (In Russ.)
 6. Norenkov I.P. *Vvedenie v avtomatizirovannoe proektirovaniye tekhnicheskikh ustroystv i sistem* [Introduction into computer-aided design of technical devices and systems]. Moscow: Machinery, 1980. 312 p. (In Russ.)
 7. Ditrikh J. *Proektirovaniye i konstruirovaniye. Sistemnyy podhod* [Design and engineering: system approach]. Moscow: Mir, 1981. 456 p. (In Russ.)
 8. Rumyantsev M.I. Some experience in the development and application of computer-aided design for rolling schedules for hot and cold rolling mills of various types. *Trudy devyatogo kongressa prokatchikov* [Proceedings of the ninth Congress of Rolling Specialists], Cherepovets, 2013, vol. 2, pp. 43–54. (In Russ.)
 9. Dimatteo A., Vannucci M. and Colla V. Prediction of Mean Flow Stress during Hot Strip Rolling Using Genetic Algorithms. *ISIJ International*, vol. 54 (2014), no. 1, pp. 171–178.
 10. Erik Parteder, Klaus Zeman, Huiying Du, and Rainer Grill. Recalculation of Flow Stresses from Industrial Process Data for Heavy Plate Rolling Using a 2D Finite Element Model. *Steel Research Int.* 83 (2012), no. 2, pp. 124–130.
 11. Rumyantsev M., Belov V., Razgulin I. Prediction model of the flow stress for the computer-aided design hot rolling sheet and strips pattern. *METAL 2015 Conference proceedings*. Ostrava: TANGER Ltd, 2015, pp. 395–403.
 12. Rumyantsev M.I. Accommodation models: Development and application for analyzing and improving sheet rolling processes. *Actualnyye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy 71-j mezhyregionalnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Important problems of contemporary science, technology and education]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2014, vol. 1, no. 1, pp. 153–156. (In Russ.)
 13. Kononov Yu.V., Ostapenko A.L., Ponomarev V.I. *Raschet parametrov listovoy prokatki* [Sheet rolling parameters calculation]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 430 p. (In Russ.)
 14. Wusatowski Z. *Fundamentals of Rolling*. Pergamon Press Ltd., Printed in Poland. Katowice: «ŚLĄSK», 2012. 692 p.
 15. Azgaldov G.G. *Upravleniye kachestvom i kvalimetriya* [Quality management and qualitymetry]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2004. (In Russ.)
 16. Oakland J. S. *Statistical Process Control*. Fifth Edition. Bodmin: MPG Books Limited. 2003. 445 p.
 17. Gun G.S. *Upravleniye kachestvom vysokotochnykh profilej* [Quality management for precision steel sections]. Moscow: Metallurgiya, 1984. 152 p. (In Russ.)
 18. Zhadan V.T., Manevich V.A. Using comprehensive quality criteria to improve the rolling process. Moscow: Metallurgiya, 1989. 96 p. (In Russ.)
 19. Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun G.S., Polyakova M.A. *Upravleniye kachestvom produkcii v tekhnologiyah metiznogo proizvodstva* [Quality management in metalware production]. Moscow: «Ruda i Metally» Publishing House, 2012. 164 p. (In Russ.)
 20. Ganguly K. Improvement process for rolling mill through the dmaic six sigma approach. *International Journal for Quality research*. 2012, vol 6, no. 3, pp. 221–231.
 21. Noskievichova D., Kucharczyk R. Effective application of statistical process control (SPC) on the lengthwise onsure rolled plates process. *Metalurgija*. 2012, vol. 51, no. 1, pp. 81–84.
 22. Noskievichova D., Woska B. Design of methodology for application of statistical control on short run processes in metallurgy. *Metalurgija*. 2014, vol. 53, no. 1, pp. 81–84.
 23. Rumyantsev M.I., Tsepkin A.S., Oplachko T.V. A unified approach to the calculation of differential indices of rolled product quality. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2007, no. 3, pp. 61–64. (In Russ.)
 24. Montgomery D.C. *Introduction to Statistical Quality Control*. Sixth Edition. Jefferson City: John Wiley & Sons. Inc. 2009. 754 p.
 25. Denisov S.V., Gorbunov A.V., Vetroenko A.G., Molostov M.A., Golubchik E.M., Shchurov G.V., Rumyantsev M.I. MMK practice of developing the manufacturing technology for hot-rolled microalloyed high strength steels for automotive and construction industries. *Modelirovaniye i razvitie protsessov obrabotki metallov davleniem* [Simulation and development of metal forming processes]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2009, pp. 39–44.
 26. Rumyantsev M.I., Galkin V.V., Gorbunov A.V., Vetroenko A.G., Molostov M.A., Popov A.O. Developing the production process and the rolling schedules for hot wide-strip mill producing high strength steels for automotive industry. *Trudy vosmogo kongressa prokatchikov* [Proceedings of the eighth Congress of Rolling Specialists]. Magnitogorsk, Oktober 11-15, 2010. Vol. 1. Magnitogorsk: Magnitogorsk Printing House, 2010, pp. 35–45. (In Russ.)
 27. Rumyantsev M.I., Gorbunov A.V., Popov A.O., Vetroenko A.G., Molostov M.F. Development of hot rolling processes for various types of rolling mills producing steel strips for various applications. Certificate of State Registration for Computer Software. No. 2013612426 dated 27/02/2013. OBPBT. 2013. No. 1.
 28. Mitsov V.S., Rumyantsev M.I., Gorbunov A.V. CR CAD. *Svid. o gos. reg. prog. dlya EC [computer]* [Certificate of State Registration for Computer Software]. No. 2013611300 dated 09/01/2013. OBPBT. 2013, no. 5, part 3, p. 982.
 29. Salganik V.M., Rumyantsev M.I. *Tekhnologiya proizvodstva listovoy stali: uchebnoe posobie* [Flat steel production process: Learner's guide]. Moscow: FSUE STC «Informregistr», 2013. State Registration No. 0321304908.
 30. Rumyantsev M.I., Ruchinskaya N.A. *Statisticheskie metody dlya obrabotki i analiza chislovoj informatsii, kontrolya i upravleniya kachestvom produkcii: uchebnoe posobie* [Statistical methods for numerical data processing and analysis and for product quality management: Learner's guide]. Moscow: FSUE STC «Informregistr», 2013. State Registration No. 0321303451.
 31. Rumyantsev M.I., Lokotunina N.M., Moller A.B. *Obrabotka metallov davleniem i kharakteristiki kachestva produkcii: uchebnoe posobie* [Metal forming and product quality characteristics: Learner's guide]. Moscow: FSUE STC «Informregistr», 2013. State Registration No. 0321303454.

Received 17/08/16

Образец для цитирования

Румянцев М.И. Некоторые результаты развития и применения методологии улучшения листопрокатных технологических систем // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №1. С. 45–55 doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-45-55

For citation

Rumyantsev M.I. Some results of the development and application of the methodology for enhancing steel sheet production systems. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 45–55. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-45-55