

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771.001

Румянцев М.И., Завалищин А.Н.

ИНЖИНИРИНГ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ ПРОДУКЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ НА ДВУХКЛЕТЕВОМ РЕВЕРСИВНОМ СТАНЕ

Аннотация. Представлен пример проектирования ресурсоэффективной технологической стратегии производства с применением двухклетевого реверсивного стана конкурентоспособного холоднокатаного проката – полос толщиной 0,9 мм из высокопрочной IF-стали классов прочности 220 и 260, легированной фосфором. Установлены пределы текучести горячекатаного подката и построены аппроксимации кривых упрочнения металла. С использованием моделей распределения обжатий, натяжений и скорости холодной прокатки, отображающих особенности процесса на двухклетевых реверсивных станах, решена задача выбора максимальной толщины горячекатаного подката при различных заданных ширинах полосы. Автоматизированным проектированием, с учетом комплекса ограничений по нагрузкам клетей и приводов, скорости прокатки, плоскостности и шероховатости полосы установили, что суммарные обжатия, рекомендуемые для обеспечения заданных свойств готовой продукции, могут быть обеспечены при ширине полос до 1250 мм. При этом толщина подката с увеличением ширины уменьшается от 3,4 до 3,0 мм для стали класса качества 220 и от 3,0 до 2,9 мм для стали 260. Скорости и производительность стана для различных классов прочности, но при одинаковых профилируемых практически одинаковые. Результаты опытной прокатки подтвердили значения и характер изменения параметров процесса, найденных в результате автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: высокопрочная IF-сталь, кривая упрочнения, процесс холодной прокатки, двухклетевой реверсивный стан холодной прокатки, максимальная ширина холоднокатаной полосы, максимальная толщина подката, механические свойства холоднокатаной полосы, шероховатость поверхности холоднокатаной полосы

Введение

Современные концепции автомобильного кузова предусматривают широкое использование марок стали, пригодных к изготовлению деталей с применением сложной вытяжки и обладающих при этом повышенным сопротивлением остаточным вмятинам [1]. В указанном контексте эффективны высокопрочные IF-стали, легированные фосфором. Преимущество легирования фосфором (до 0,12%) заключается в том, что не только достигается требуемая прочность, но также улучшается сопротивляемость атмосферной коррозии [2, 3]. Благодаря сочетанию коррозионной стойкости с хорошими характеристиками по ударной и усталостной прочности эти стали часто применяются для конструктивных элементов и внешней обшивки кузова [1-3].

В ПАО «ММК» в период освоения производства высокопрочного проката для автомобилестроения изучали аналоги марок HC220P и HC260P высоко-

прочной IF-стали, легированной фосфором, с обозначениями H220P и H260P [4]. Была поставлена задача определить толщину горячекатаного подката для прокатки опытных партий проката толщиной 0,9 мм, шириной 1000–1400 мм на двухклетевом реверсивном стане.

Двухклетевые реверсивные станы, которые получили специфическое обозначение ССМ (Comcast Cold Mill), появились в конце 90-х годов XX века как экономически эффективное решение для производства холоднокатаной листовой стали в количестве до 500-900 тыс. т/год [5-8]. В основном по составу оборудования стан ССМ аналогичен одноклетевому реверсивному. Основные отличия – две рабочие клетки и отводящие транспортеры у каждой реверсивной моталки. Таким образом, на подобном стане могут быть реализованы, по крайней мере, три стратегии прокатки: двукратная (рис. 1, б), четырехкратная (рис. 1, в) и шестикратная (рис. 1, г), что по количеству обжатий

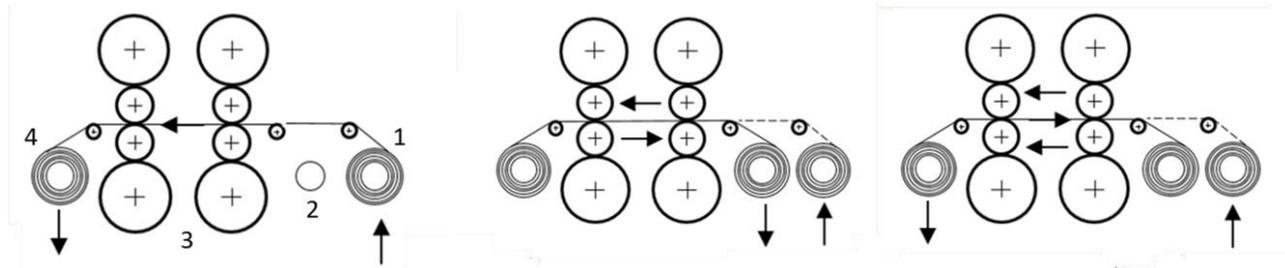


Рис. 1. Стратегии прокатки на стане ССМ:
1 – разматыватель; 2 и 4 – реверсивные моталки № 2 и 1; 3 – рабочие клетки

соответствует случаям прокатки на двухклетевом, четырехклетевом и шестиклетевом непрерывных станах (ТСМ – Tandem Cold Mill).

Для решения задачи были уточнены закономерности прокатки и разработаны модели режимов работы станов различных типов при прокатке листового проката различного назначения [9]. В данной статье представлен пример использования этих моделей при инжиниринге технологии производства высокопрочной IF-стали, легированной фосфором, с применением четырехкратной стратегии.

Разработка режима холодной прокатки на двухклетевом реверсивном стане

Предварительные испытания горячекатаного подката показали, что предел текучести в ненаклепанном (недеформированном) состоянии стали H220P находится в пределах 260-310 МПа, а стали H260P – от 290 до 345 МПа. С целью определения особенностей упрочнения стали указанных марок на дрессировочном стане прокатывали образцы шириной 50 и длиной 500 мм, стараясь обеспечить обжатия 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 и 70% с не менее чем трехкратными повторениями. За напряжение текучести σ_f наклепанных образцов принимали условное напряжение σ_{02} . Зависимость напряжения от суммарного обжатия представлены на рис. 2.

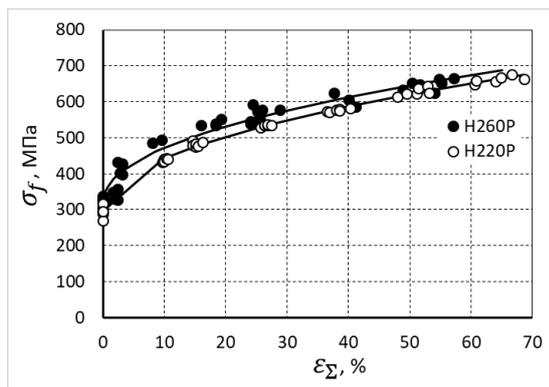


Рис. 2. Кривые упрочнения стали марок H220P и H260P

Кривые упрочнения аппроксимировали уравнением

$$\sigma_f = c_0 + c_1 \cdot \varepsilon_{\Sigma}^2, \tag{1}$$

где $\varepsilon_{\Sigma} = 100(H - h)/H$ – суммарное обжатие полосы от толщины подката H до толщины h . Значения коэффициентов c_0 , c_1 и c_2 (табл. 1) находили с использованием программного комплекса STATISTICA. Оценки достоверности и статистической надежности также приведены в табл. 1.

На основании известных рекомендаций [2] суммарное обжатие при прокатке на толщину 0,9 мм должно быть 70-75%, то есть необходим подкат толщиной 3,0-3,6 мм соответственно. Рассматривали прокатку по-

лос шириной 1000, 1080, 1160, 1240, 1320 и 1400 мм с учетом комплекса ограничений на холодную прокатку тонких полос [10-14]. Для каждой ширины проектирование режима начинали с максимальной толщины подката 3,6 мм и уменьшали ее с шагом 0,1 мм до тех пор, пока в каждом проходе не выполнялся комплекс ограничений по нагрузкам клетей и приводов ($Z_p \leq 0,8$; $Z_{Мав} \leq 0,8$;

$Z_w \leq 0,8$), скорости прокатки ($0,8v_{ном} \leq v_{уст.i} \leq 0,8[v]_{max}$)

и плоскостности [$-80(h_{i_i}/b)^2 \leq \Delta\lambda/\bar{\lambda} \leq 40(h_{i_i}/b)^2$].

Таблица 1

Коэффициенты и оценки аппроксимаций кривых упрочнения стали марок H220P и H260P

Марка стали	Коэффициенты			Оценки достоверности и надежности		
	c_0	c_1	c_2	R^2	F_p	F_{95}
H260P	319	52,3	0,47	0,955	335,873	3,294
H220P	291	49,8	0,48	0,996	3988,004	

В ограничениях по нагрузкам клетей и приводов $Z_Y = Y/[Y]$ – отношение фактического значения параметра (силы прокатки P , момента на валу двигателя $M_{дв}$ и мощности W) к их предельным значениям в соответствии с характеристикой стана. Нижний предел скорости установившегося процесса $v_{уст.i}$ был принят на уровне 80% от номинального значения $v_{ном}$, а верхний предел – на уровне 80% от максимальной допустимой $[v]_{max}$ по характеристике привода клетей. В ограничении по плоскостности b и h_{i_i} – ширина прокатываемой полосы и ее толщина на выходе из клетки в i -м проходе; $\bar{\lambda} = h_{0i}/h_{i_i}$ – усредненное значение вытяжки.

Первые приближения распределения обжатий, натяжений и уставки скорости прокатки выбирались программой автоматически с учетом особенностей прокатки на двухклетевых реверсивных станах [15] и в дальнейшем, при необходимости, корректировались для обеспечения указанных выше ограничений. Неравномерность профиля валков ΔS от 0,15 до 0,3 мм, а также соотношение между усилием принудительно-го изгиба валков и усилием прокатки F/P в пределах от -0,014 до +0,022 также выбирались компьютерной программой случайным образом из указанных диапазонов, которые были выявлены И.В. Виером при выполнении исследований [16, 17]. Так как прокат должен поставляться с микрогеометрией поверхности $Ra = 0,8-1,6$ мкм, моделировали прокатку с шероховатыми валками в первой клетке ($Ra_{в1} = 1,5-2,0$ мкм) и со шлифованными во второй ($Ra_{в2} = 0,6-0,8$ мкм). Конкретные значения параметров $Ra_{в}$ выбирались из

указанных диапазонов программно с помощью датчиков случайных чисел.

В итоге установили, что рекомендуемые суммарные обжатия (не менее 70%) и достаточно близкие к ним (68,9%) могут быть обеспечены при ширине полос до 1240-1250 мм. При этом толщина подката с

увеличением ширины должна уменьшаться от 3,4 до 3,0 мм для стали Н220Р и от 3,0 до 2,9 мм для стали Н260Р. Ожидаемые скорости прокатки и производительность стана для одинаковых профиларазмеров практически одинаковые (табл. 2). Режимы и некоторые параметры прокатки представлены на рис. 3.

Таблица 2

Рекомендуемые толщина подката и прогнозируемые результаты прокатки полос толщиной 0,9 мм из стали марок Н220Р и Н260Р

b_0 , мм	G_p , т	Прокатка стали Н220Р					Прокатка стали Н260Р				
		H_0 , мм	Скорость, м/с		Ra_n , мкм	Ритм r , с	H_0 , мм	Скорость, м/с		Ra_n , мкм	Ритм r , с
			v_2	v_4				v_2	v_4		
1000	21,8	3,4	11,8	15,5	1,22-1,35	545,3	3,0	13,3	15,6	1,32-1,62	541,5
1080	23,3	3,2	11,9	15,1	1,37-1,44	550,1	3,0	12,4	15,1	1,14-1,71	551,7
1160	25,2	3,0	11,9	15,1	1,29-1,71	554,4	2,9	11,9	15,1	1,35-1,44	557,5
1240	26,9	3,0	11,4	15,1	1,18-1,53	563,3	2,9	11,9	15,1	1,20-1,35	565,4
1320	28,6	2,8	11,4	15,1	1,32-1,53	563,4	2,8	11,4	15,1	1,20-1,44	546,6
1400	30,3	2,8	10,9	15,1	1,31-1,53	572,9	2,7	10,9	15,1	1,29-1,47	582,3

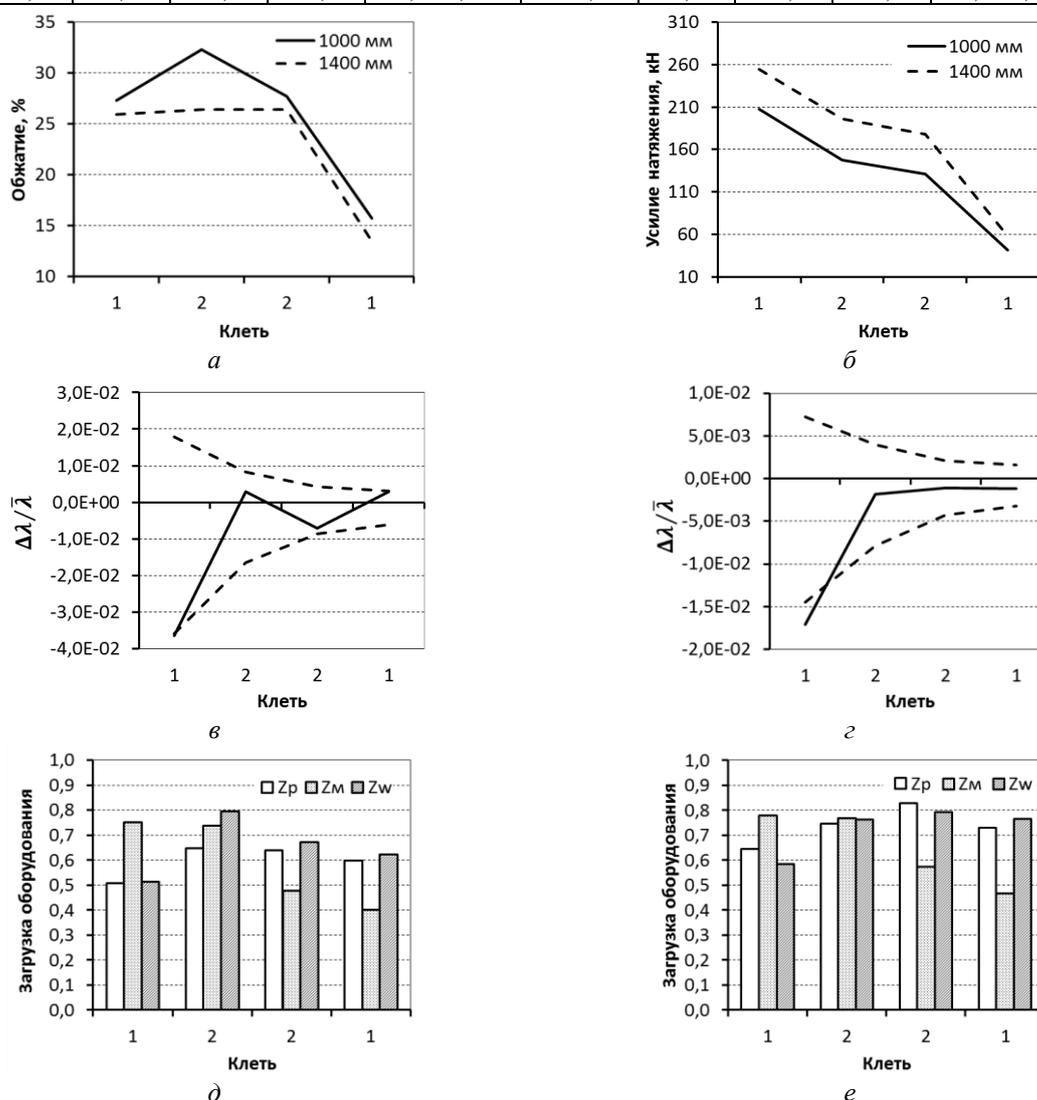


Рис. 3. Рекомендованные режимы обжатий (а) и натяжений (б), прогноз устойчивости плоской формы при прокатке полос шириной 1000 (в) и 1400 мм (г), ожидаемые загрузки оборудования при прокатке полос шириной 1000 (д) и 1400 мм (е) из стали Н220Р

Опробование технологии производства холодного проката высокопрочной ИГ-стали

С использованием высказанных рекомендаций были произведены опытные партии продукции [18]. Холодная прокатка на двухклетевом реверсивном стане (суммарное обжатие 66,7%) осуществлялась по стратегии четырехкратного обжатия. Режим и параметры прокатки полос из стали H260P иллюстрируются графиками на рис. 4, которые построены на основании осциллограмм, полученных с помощью датчиков АСУ ТП.

Значения и характер изменения тех же параметров, найденные в результате автоматизированного проектирования, соответствовали наблюдавшимся при опытной прокатке. Прогнозируемый ритм прокатки (541-582 с) (см. табл. 2) находился в пределах фактического ритма (513-689 с). Контроль шероховатости прокатанных полос показал результат $Ra = 1,7$ мкм. Приведенное сравнение фактических и прогнозируемых параметров прокатки свидетельствуют о достаточно высокой точности результатов автоматизированного проектирования режимов прокатки.

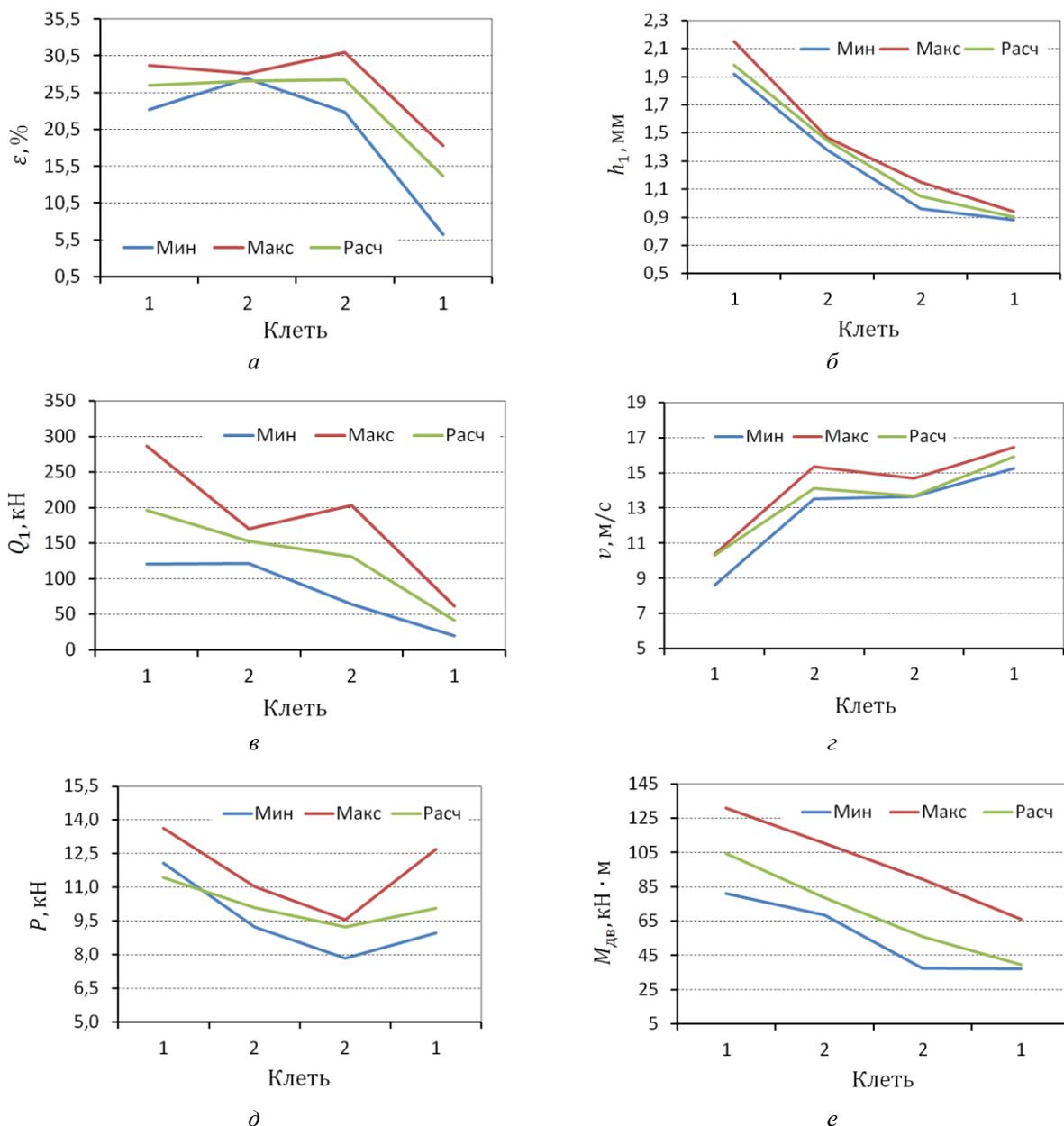


Рис. 4. Расчетные (Расч) и фактические (Мин; Макс) параметры прокатки на двухклетевом реверсивном стане 1700 полос стали H260P 0,9×1000 мм из подката толщиной 2,7 мм:
 а – частные обжатия; б – толщина на выходе из клетки; в – усилие переднего натяжения;
 г – скорость прокатки; д – усилие прокатки; е – момент на валу двигателя

Также исследовали влияния дрессировки на свойства металла, отожженного в водородной защитной атмосфере. С использованием показателей соответствия [19,20] было установлено, что при обжатии около 0,5% металла партии Н220Р (рис. 5, а) приобретает свойства, удовлетворяющие требованиям EN 10130 для проката марки НС220Р. После дрессировки с обжатием более 0,5% металл имеет отрицательные характеристики соответствия требованиям EN 10130 по временному сопротивлению и относительному удлинению. Характеристики соответствия коэффициента нормальной пластической анизотропии и показатель упрочнения положительные, но в основном не превышают единицы. В целом по всему комплексу свойств металл партии Н220Р после дрессировки с обжатием 0,3-0,5% можно признать соответствующим нормам стандарта EN 10130 для проката марки НС220Р.

Свойства металла партии Н260Р являются допустимыми при дрессировке с обжатием до 2,5% (рис. 5, б). Дальнейшее увеличение обжатия приводит к завышенному временному сопротивлению и заниженному относительному удлинению. В целом по всему комплексу свойств обнаруживается достаточно хорошее соответствие нормам стандарта EN 10130 при дрессировке с обжатием 1,5-2,0%.

Результаты выполненного анализа были использованы в дальнейшем для создания промышленной технологии производства конкурентоспособного импортозамещающего холоднокатаного листового проката из высокопрочной IF-стали, легированной фосфором, классов прочности 220 [21] и 260 [22].

Заключение

Решена задача выбора максимальной толщины горячекатаного подката из высокопрочной IF-стали, легированной фосфором, для холодной прокатки на двухклетевом реверсивном стане при различных заданных ширинах полосы. Автоматизированным проектированием с учетом комплекса ограничений по загрузкам клеток и приводов, скорости прокатки, плоскостности и шероховатости полосы установили, что суммарные обжатия, рекомендуемые для обеспечения заданных свойств готовой продукции, могут быть обеспечены при ширине полос до 1250 мм. При этом толщина подката с увеличением ширины уменьшается от 3,4 до 3,0 мм для стали класса прочности 220 и от 3,0 до 2,9 мм для стали класса прочности 260. Скорости и производительность стана для различных классов прочности при одинаковых профилеразмерах практически одинаковые.

Анализом результатов опробования опытной технологии производства высокопрочной IF-стали, легированной фосфором, с применением оценок соответствия, показано, что холоднокатаные полосы, полученные на двухклетевом реверсивном стане с суммарным обжатием не менее 66,7% и отожженные в копкаковых печах с водородной защитной атмосферой, отвечают требованиям стандарта EN 10130 к прокату класса прочности 220 после дрессировки с обжатием 0,3-0,5 % и требованиям к прокату класса прочности 260 после дрессировки с обжатием 1,5-2,0 %.

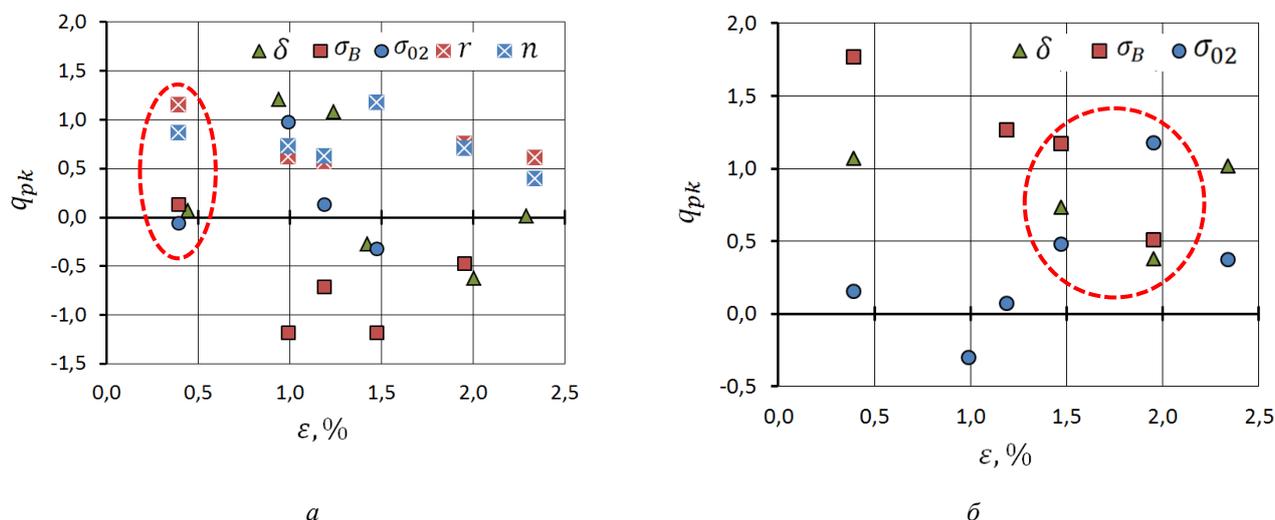


Рис. 5. Влияние обжатия при дрессировке на показатели соответствия механических свойств опытного металла Н220Р и Н260Р требованиям стандарта EN 10130 к высокопрочному холоднокатаному прокату НС220Р и НС260Р [18]

Список источников

1. Юсупов В.С., Адигамов Р.Р. Тенденции мирового развития автомобильных листовых сталей // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2025. Т. 81. №1. С. 30-37. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2025-01-30-37>
2. Беляковский М.А., Масленников В.А. Автомобильная сталь и тонкий лист. Череповец: Издательский дом «Череповец», 2007. 625 с.
3. Родионова И., Филиппов Г. Технологические аспекты производства сталей для автомобилестроения // *Инженер-механик*. 2010. № 4. С. 25-30.
4. Магнитогорский металлургический комбинат. Каталог металлопроката. Автомобильная промышленность. https://mmk.ru/catalogs/metal_products/automotive_industry/files/assets/basic-html/page212.html
5. The compact cold mill (CCM). *Steel Times Int.* 1997. Vol. 21. No. 2, p. 38
6. Создание и освоение двухклетового реверсивного стана холодной прокатки / В.Ф. Рашников, Р.С. Тахтаутдинов, А.И. Антипенко [и др.] // *Сталь*. 2003. № 7. С. 41-45.
7. Chen Q. Concept, design and operational results of the Compact Cold Mill at Jinan Iron Et Steel // *Stahl und Eisen*. 2007/02/15. P. 53-58
8. Liu, Guangming & Li, Yugu & Huang, Qingxue & Yang, Xia & Liu, Aimin. Analysis of Startup Process and Its Optimization for a Two-Stand Reversible Cold Rolling Mill. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/8715340>
9. Румянцев М. И. Опыт развития и применения автоматизированного проектирования режимов горячей и холодной прокатки листовой стали различного назначения на станах различных типов // *Труды IX Конгресса прокатчиков, Череповец, 16–18 апреля 2013 года*. Череповец: ОАО «Черметинформация», 2013. Т. 2. С. 43-54.
10. Технологические особенности производства холоднокатаного автомобильного листа из новой коррозионностойкой экономнолегированной стали с ВН-эффектом / В.В. Кузнецов, Э.А. Гарбер, В.С. Юсупов, Д.Л. Шалаевский // *Производство проката*. 2007. № 11. С. 9–12.
11. Ланге Э. Инновационные технологические модели: оптимизация процесса производства плоского стального проката // *Черные металлы*. 2017. № 9. С. 42-46.
12. Kozhevnikov A., Kozhevnikova I., Bolobanova N. Development of the model of cold rolling process in dynamic conditions // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2018. Vol. 53. No. 2. P. 366-372.
13. Решения для производства высокопрочных сталей и тонкой холоднокатаной полосы / К. Кримпельштеттер, И. Маэно, М. Бергман, Г. Кайнтцель // *Черные металлы*. 2020. №4. С. 22-32.
14. Shatalov R.L., Kulikov M.A. Influence of Outer Parts of a Strip on the Deformation and Force Parameters of Thin-Sheet Rolling. *Metallurgist*, 2020, 64 (7-8), pp. 687-698.
15. Развитие валковых систем CVC на основе математического моделирования для повышения качества холоднокатаного проката и стойкости валков / В.М. Салганик, И.В. Виер, П.П. Полецков, М.И. Румянцев // *Труды Пятого конгресса прокатчиков. (Череповец, 21-24 октября 2003 г.)*. М.: Черметинформация, 2004. С. 146-150.
16. Виер И.В. Моделирование профилировки валков клеток кварто для расширения диапазона регулирования плоскостности холоднокатаных полос и повышения стойкости инструмента: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2004. 170 с.
17. Развитие и применение методики разработки и совершенствования технологий производства листового проката / М. И. Румянцев, А.Н. Завалищин, А.В. Горбунов [и др.] // *Труды XI Конгресса прокатчиков, Магнитогорск, 09–11 октября 2017 года*. Магнитогорск: ОАО «Черметинформация», 2017. Т. 2. С. 427-435.
18. Rumyantsev M. I. Some approaches to improve the resource efficiency of production of flat rolled steel // *CIS Iron and Steel Review*. 2016. Vol. 12. P. 32-36. DOI: 10.17580/cisr.2016.02.07. EDN YUZWUD.

Сведения об авторах

Румянцев Михаил Игоревич – профессор кафедры технологий обработки материалов, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: mikhail.rumyantsev54@bk.ru. ORCID: 0000-0003-0608-0446

Завалищин Александр Николаевич – профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: zaval1313@mail.ru

PROCESS ENGINEERING COMPETITIVE PRODUCTS USING COLD ROLLING AT TWO STAND REVERSING MILL

Rumyantsev Mikhail I. – Professor of the Department of Material processing, Doctor of Technical Sciences, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mikhail.rumyantsev54@bk.ru

Zavalishchin Aleksandr N. – Professor of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Doctor of Technical Sciences, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: zaval1313@mail.ru

Abstract. An example of computer engineering of a resource-efficient technological strategy for the production of cold-rolled steel using a two-stand reversible mill is presented. Strips 0.9 mm thick of high-strength IF steel of quality classes 220 and 260, doped with phosphorus, were obtained. The yield strength of the hot-rolled steels was revealed and approximations of the metal hardening curves were obtained. Using models of distribution of reduce, tension and speed for cold rolling, which take into account the peculiarities of the process at two-stand reversing mills, the problem of determining the maximum thickness of a hot-rolled stock at various required widths of the strip is solved. Using computer-aided design, taking into account a set of restrictions on the loads of stands and drives, rolling speed, flatness and roughness of the strip, it was found that the total reductions recommended to ensure the specified properties of the finished product can be provided with a strip width of up to 1250 mm. At the same time, the thickness of the hot-rolled stock with increasing width decreases from 3.4 to 3.0 mm for steel of quality class 220 and from 3.0 to 2.9 mm for steel of quality class 260. For equivalent section sizes, rolling speeds and mill capacities of different quality classes are practically the same. The test rolling results confirmed the values and the nature of the change in process parameters that were found as a result of computer-aided design.

Keywords: high-strength IF-steel, metal hardening curves, cold rolling process, two-stand reversing cold rolling mill, cold rolled strip of maximum width, hot-rolled strip of maximum thickness, mechanical properties of cold-rolled strip, surface roughness of cold-rolled strip

Ссылка на статью:

Румянцев М.И., Завалишин А.Н. Инжиниринг технологии производства конкурентоспособной продукции с применением холодной прокатки на двухклетевом реверсивном стане // Теория и технология металлургического производства. 2025. №2(53). С. 30-36.
Rumyantsev M.I., Zavalishchin A.N. Process engineering competitive products using cold rolling at two stand reversing mill. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 53, no. 2, pp. 30-36.