

С.А.Воробей, В.Г.Раздобрев, Д.Г.Паламарь

**МЕТОД ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА
СТАБИЛЬНОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРЯЧЕКАТАНОГО
ПРОКАТА**

Институт черной металлургии им. З.И.Некрасова НАН Украины

Представлен анализ причин формирования нестабильности механических свойств горячекатаных полос, арматурного проката и катанки. Для анализа использована разработанная ранее математическая модель формирования структуры и механических свойств горячекатаного проката. Показано, что перечень факторов, влияющих на стабильность механических свойств, и их значимость изменяются на различных прокатных станах и различном сортаменте проката. Результаты выполненных исследований позволяют разрабатывать технические и технологические решения, направленные на увеличение стабильности показателей качества проката.

Ключевые слова: горячекатаная полоса, арматурный прокат, катанка, стабильность механических свойств

Современное состояние вопроса. Обострение конкуренции на мировом рынке производителей стального проката требует от металлургических предприятий Украины, в первую очередь, повышения качества продукции. Важными показателями качества горячекатаного полосового и сортового проката является стабильность механических свойств, микроструктуры и геометрических размеров. Показатели качества стального проката, производимого на предприятиях Украины, в основной своей массе соответствует требованиям национальных, международных и зарубежных стандартов. В тоже время, они существенно уступают фактическим показателям качества аналогичного проката, производимого на современных зарубежных станах, особенно по их стабильности, например разброс значений прочностных свойств проката, производимого на отечественных и лучших зарубежных предприятиях составляет (приведено в скобках):

- широкополосного проката - $\pm 30-65 \text{ Н/мм}^2$ ($\pm 20-25 \text{ Н/мм}^2$);
- арматурного проката - $\pm 80-160 \text{ Н/мм}^2$ ($\pm 50-90 \text{ Н/мм}^2$);
- катанки - $\pm 50-140 \text{ Н/мм}^2$ ($\pm 40-80 \text{ Н/мм}^2$).

Для оценки приведенных данных укажем, что, например, по данным работы [1] уменьшение колебаний предела текучести низкоуглеродистых сталей на 20 Н/мм^2 при применении их в изделиях, рассчитанных на прочность, позволяет сократить расход металла на 5-7 %

Приведенные данные показывают, что разработка теоретических и технологических решений, обеспечивающих увеличение стабильности показателей качества горячекатаного сортового и полосового проката, является актуальной для металлургических предприятий Украины.

Оценивая нестабильность показателей качества проката, следует отметить три ее уровня: первый – колебания значений показателей качества по длине одного проката; второй - между прокатом одной партии (плавки); третий - между прокатом различных плавков. Сдаточные значения показателей качества промышленных партий проката определяются, как правило, на ограниченном количестве образцов, отобранных в определенном месте по длине проката. Для длинномерного проката – на некотором, оговоренном в стандартах, расстоянии от заднего конца. Таким образом, сдаточные испытания не дают полного представления о распределении показателей качества по длине проката, за исключением тех случаев, когда измерение производится неразрушающими методами в потоке станов.

Современные технологии производства горячекатаного проката предусматривают широкое использование режимов обработки металла и управляющих средств, повышающих стабильность показателей качества продукции [2-5]. Соответственно, зарубежными исследователями проводятся разработки, направленные на дальнейший поиск технологических решений, позволяющих стабилизировать структуру, механические свойства и геометрические размеры проката. Результаты таких исследований внедряются, как правило, в системах управления технологическими процессами. В то же время эти результаты не публикуются в объемах, достаточных для их использования.

В Украине такие разработки проводятся очень ограниченно и носят, как правило, узко прикладной характер, или учитывают отдельные факторы [6-8]. Для прогнозирования механических свойств наиболее распространены эмпирические зависимости, полученные на конкретном прокатном стане. Однако их нельзя использовать в условиях других объектов. Характер разработок, проводимых в странах СНГ, аналогичный.

Таким образом, общие взаимосвязанные закономерности влияния химического состава стали, параметров прокатки, термообработки в потоке станов и параметров оборудования на стабильность показателей качества горячекатаного проката изучены недостаточно.

Изложение основных материалов исследований. Повышение стабильности показателей качества проката на основе эмпирических зависимостей не всегда позволяет получить положительный результат. Это обусловлено следующими причинами:

- большое количество факторов, оказывающих влияние на показатели качества продукции;
- сложность построения адекватных эмпирических моделей из-за узкого интервала варьирования технологическими параметрами в условиях промышленных объектов;
- взаимная корреляция многих технологических параметров, не позволяющая выявить влияние каждого параметра отдельно;

- ограниченное число параметров, измеряемых в процессе производства продукции;
- трудоемкость проведения промышленных исследований.

В последние 10-20 лет разработаны и широко применяются достаточно надежные математические модели прогнозирования параметров деформационно-термической обработки и показателей качества проката, основанные на физических закономерностях. В связи с этим, наиболее перспективным представляется подход к решению задачи повышения стабильности показателей качества проката, основанный на использовании таких моделей в совокупности с фактическими параметрами распределения технологических параметров на исследуемом объекте. Основные этапы такого подхода (метода) следующие:

- создание баз данных о технологических параметрах производства и показателях качества продукции исследуемого объекта;
- проверка и адаптация теоретических моделей прогнозирования параметров деформационно-термической обработки и показателей качества проката;
- дополнение моделей блоками, позволяющими учитывать стохастический характер технологических параметров и оценивать параметры распределения расчетных величин (метод Монте-Карло);
- получение количественных характеристик распределения фактических технологических параметров;
- проведение расчетов параметров производства и показателей качества продукции с использованием метода статистических испытаний;
- установление степени влияния колебаний параметров производства на разброс значений показателей качества продукции;
- на основе анализа полученных результатов разработка способов стабилизации показателей качества продукции.

Анализу технологии как многофакторного случайного процесса позволяет определить наиболее эффективные решения стабилизации показателей качества продукции.

Такой стохастический подход для анализа стабильности параметров прокатки в чистой группе клетей широкополосных станов горячей прокатки (ШСГП) нами был применен еще в 80-90 годы [9] и позволил решить ряд задач по стабилизации толщины, профиля поперечного сечения и плоскостности полос.

В данной работе этот метод был применен для анализа причин формирования нестабильности механических свойств горячекатаных полос, арматурного проката и катанки. Для этого были использованы разработанные нами математические модели формирования структуры и механических свойств горячекатаного проката [10].

Методика исследования состояла в следующем. В качестве исходных данных для расчетов использовали реальные массивы значений параметров

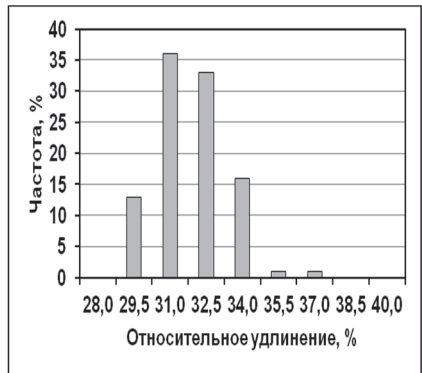
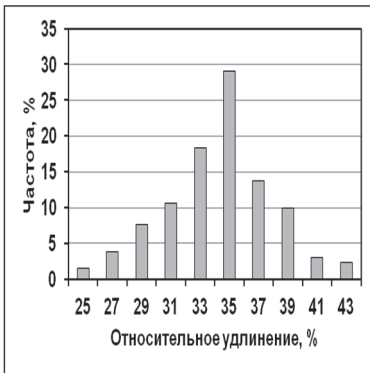
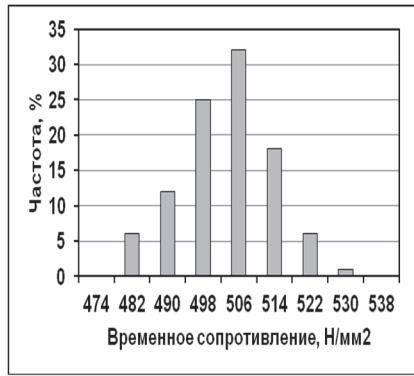
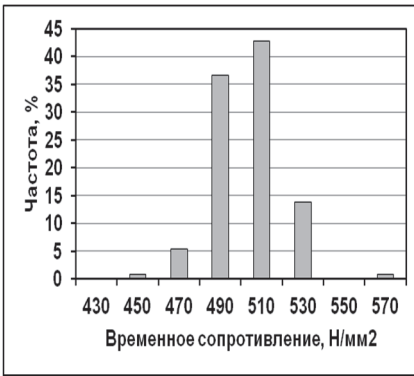
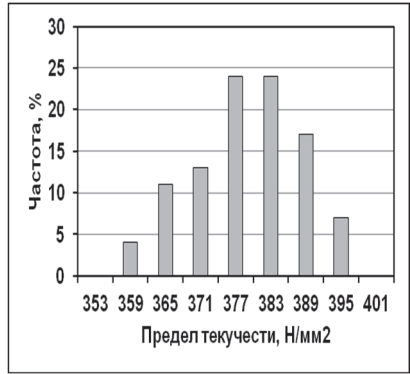
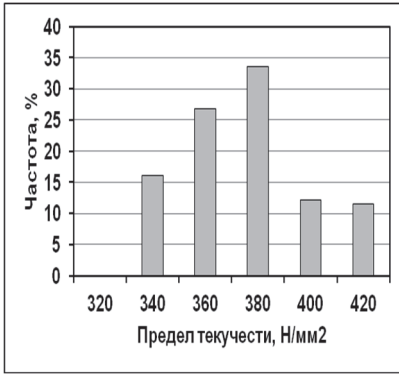
прокатки и последеформационного охлаждения проката на промышленных прокатных станах. В программы задавали средние значения и средние квадратические отклонения параметров и рассчитывали средние значения и средние квадратические отклонения показателей качества проката. Затем поочередно задавали значения среднего квадратического отклонения каждого исходного параметра, приняв значения остальных параметров постоянными (средними), и рассчитывали среднее квадратическое отклонение показателей качества проката. После этого оценивали долю влияния колебаний каждого параметра на среднее квадратическое отклонение показателей качества проката. Следует отметить, что сумма средних квадратических отклонений показателей качества проката, вызванных колебаниями значений исходных параметров, всегда больше, чем среднее квадратическое отклонение при одновременном колебании значений всех исходных параметров. Это вызвано тем, что колебания значений исходных параметров носят случайный характер и в некоторых случаях компенсируют друг друга. Тем не менее, такая методика позволяет определить степень влияния каждого исследованного фактора.

Широкополосный прокат.

Исследование влияния колебаний параметров прокатки на механические свойства горячекатаных полос анализировали на примере прокатки полос размером 5,0×1060 мм из стали марки 20.

На рис. 1 показаны фактические и расчетные гистограммы распределения значений механических свойств проката толщиной 5,0 мм из стали марки 20.

Приведенные данные показывают, что погрешность расчета средних значений предела текучести, временного сопротивления разрыву и относительного удлинения удовлетворительная – 4; 2 и 10 % соответственно. Однако разброс расчетных данных существенно меньше, чем фактических. Это объясняется тем, что в любой модели невозможно учесть все влияющие факторы. Наибольшее различие расчетных и фактических диапазонов разброса значений наблюдается при расчете относительного удлинения. Большой диапазон колебаний значений относительного удлинения известен из опыта промышленного производства проката – для предела текучести и временного сопротивления разрыву коэффициент вариации, как правило, составляет 2-6 %, а относительного удлинения – 6-11 %, а иногда и более. Объясняется это тем, что относительное удлинение существенно зависит от таких трудно контролируемых факторов, как состав, наличие и распределение неметаллических включений; равномерность структуры и субструктуры проката; насыщенность металла газами, величина остаточных напряжений и др.



Фактические данные

Расчетные данные

Рисунок 1 – Гистограммы распределения механических свойств проката толщиной 5,0 мм из стали марки 20

При необходимости, в программах предусмотрена возможность учета случайного рассеивания параметров.

Результаты анализа влияния различных факторов на разброс значений механических свойств полос приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Расчетное влияние колебаний содержания химических элементов в стали и параметров прокатки на отклонения механических свойств полос размером 5,0×1060 мм из стали марки 20

Наименование параметров	Экспериментальные данные		Расчетные данные					
	Среднее значение	Среднее квадратическое отклонение	Среднее квадратическое отклонение			Доля влияния параметра, %		
			σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ_5 , %	σ_T	σ_B	δ_5
C, %	0,188	0,010	7,96	8,88	0,71	34,4	40,9	36,0
Mn, %	0,465	0,027	3,61	2,83	0,33	15,6	13,0	16,8
Si, %	0,203	0,022	1,95	2,42	0,06	8,4	11,1	3,1
Ni, %	0,023	0,007	0,12	0,26	0,03	0,5	1,2	1,5
Cr, %	0,029	0,007	0,47	0,55	0,06	2,0	2,5	3,1
Cu, %	0,045	0,010	0,09	0,09	0,02	0,4	0,4	0,8
Al, %	0,051	0,01	0,55	0,55	0,06	2,4	2,5	3,1
P, %	0,015	0,002	1,11	1,11	0,14	4,8	5,1	6,9
N ₂ , %	0,005	0,001	2,22	-	-	9,6	-	-
h _п , мм	4,97	0,09	1,11	1,41	0,17	4,8	6,5	8,4
ϵ (отн.)	0,18	0,01	0,98	0,43	0,05	4,2	2,0	2,3
T _{кп} , °C	780	6,7	1,47	1,59	0,18	6,3	7,3	9,2
T _{см} , °C	590	6,7	1,53	1,59	0,18	6,6	7,3	9,2
σ_T , Н/мм ²	366	24,3	13,9	-	-			
σ_B , Н/мм ²	494	15,4	-	13,0	-			
δ_5 , %	33,9	3,6	-	-	1,96			

В таблице приняты следующие обозначения: h_п – толщина полосы; ϵ – накопленная степень деформации; T_{кп} – температура конца прокатки; T_{см} – температура смотки.

Результаты расчетов показали, что наибольшее влияние на колебания механических свойств полос размером 5,0×1060 мм оказывают колебания значений следующих параметров (в порядке убывания значимости):

- содержания углерода в стали;
- содержания марганца в стали;
- содержания кремния в стали;
- температуры смотки;
- температуры конца прокатки.

Следует отметить, что количественное влияние исследованных факторов на колебания значений предела текучести, временного сопротивления разрыву и относительное удлинение несколько отличаются, но перечень влияющих факторов практически одинаков.

Арматурный прокат.

Исследование влияния колебаний содержания химических элементов в стали и параметров прокатки на механические свойства арматурного проката анализировали на примере двух видов такой продукции:

- горячекатаный арматурный прокат № 10 из стали марки 25Г2С, микролегированной ванадием и ниобием;
- термоупрочненный арматурный прокат № 12 из низкоуглеродистой стали.

Результаты выполненных расчетов приведены в табл. 2 и 3. В таблицах приняты следующие обозначения: R_p – радиус проката; ε - накопленная степень деформации; $T_{кп}$ – температура конца прокатки; $v_{пр}$ – скорость прокатки.

Таблица 2 – Расчетное влияние колебаний содержания химических элементов в стали и параметров прокатки на отклонения механических свойств горячекатаного арматурного проката № 10 из стали 25Г2С, микролегированной ванадием и ниобием

Наименование параметров	Экспериментальные данные		Расчетные данные					
	Среднее значение	Среднее квадратическое отклонение	Среднее квадратическое отклонение			Доля влияния параметра, %		
			σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ_5 , %	σ_T	σ_B	δ_5
C, %	0,211	0,007	1,1	1,9	0,10	7,7	10,7	10,6
Mn, %	1,474	0,028	1,6	1,7	0,10	11,2	9,6	10,6
Si, %i	0,428	0,011	0,6	0,7	0,04	4,2	4,0	4,2
Nb, %	0,021	0,001	2,6	4,8	0,24	18,2	27,1	25,4
V, %	0,078	0,002	3,6	6,1	0,31	25,2	34,5	33,8
R_p , мм	5,0	0,05	0	0	0	0	0	0
ε (отн.)	0,80	0,01	0,2	0,1	0,004	1,4	0,6	0,4
$T_{кп}$, °C	1100	20	4,5	2,3	0,14	31,5	13,0	14,8
$v_{пр}$, м/с	80,0	2,0	0,1	0,1	0,01	0,7	0,6	1,1
σ_T , Н/мм ²	539	24,6	14,2	-	-			
σ_B , Н/мм ²	773	43,2	-	17,6	-			
δ_5 , %	20,2	3,34	-	-	0,93			

Результаты расчетов показали, что наибольшее влияние на разброс механических свойств арматурного проката № 10 из стали 25Г2С, микролегированной ванадием и ниобием, оказывают колебания значений следующих параметров (в порядке убывания значимости):

- содержания ванадия в стали;
- содержания ниобия в стали;
- температуры конца прокатки;
- содержания марганца в стали;
- содержания углерода в стали.

Таблица 3 – Расчетное влияние колебаний содержания химических элементов в стали и параметров прокатки на отклонения механических свойств термоупрочненного арматурного проката № 12 из низкоуглеродистой стали

Наименование параметров	Экспериментальные данные		Расчетные данные					
	Среднее значение	Среднее квадратическое отклонение	Среднее квадратическое отклонение			Доля влияния параметра, %		
			σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ_5 , %	σ_T	σ_B	δ_5
C, %	0,200	0,011	10,4	11,2	0,26	23,4	24,5	17,0
Mn, %	0,580	0,025	1,2	1,5	0,07	2,7	3,3	4,6
Si, %i	0,080	0,010	0,6	0,8	0,11	1,3	1,7	7,2
Rп, мм	6,0	0,05	9,3	11,0	0,38	20,9	24,0	24,8
ε (отн.)	0,70	0,01	0,2	0,1	0	0,4	0,2	0
Tкп, °С	1050	12	8,0	7,6	0,26	18,0	16,6	17,0
$v_{пр}$, м/с	30,0	1,0	14,8	13,6	0,45	33,3	29,7	29,4
σ_T , Н/мм ²	599	39,1	29,0	-	-			
σ_B , Н/мм ²	693	38,4	-	27,1	-			
δ_5 , %	20,9	1,72	-	-	0,91			

Колебания радиуса проката и скорости прокатки на разброс механических свойств горячекатаного арматурного проката практически не влияют. Это объясняется тем, что при последеформационном охлаждении проката на воздухе данные параметры незначительно влияют на скорость охлаждения, а, следовательно, на условия формирования структуры и механических свойств.

Результаты расчетов показали, что наибольшее влияние на разброс механических свойств термоупрочненного арматурного проката № 12 из низкоуглеродистой стали оказывают колебания значений следующих параметров (в порядке убывания значимости):

- скорости прокатки;
- содержания углерода в стали;
- радиуса проката;
- температуры конца прокатки.

Влияние колебаний температуры конца прокатки, скорости прокатки, радиуса проката проявляется, главным образом, через их влияние на изменение температуры самоотпуска, которая определяет состав и соотношение структурных составляющих проката.

Катанка.

Исследование влияния колебаний содержания химических элементов в стали и параметров прокатки на механические свойства катанки анализировали на примере катанки диаметром 5,5 мм из стали марки SAE 1006.

Результаты выполненных расчетов приведены в табл. 4. В таблице приняты следующие обозначения: R_p – радиус проката; ε - накопленная степень деформации; $T_{кп}$ – температура конца прокатки; $T_{во}$ – температура за виткообразователем; $\alpha_{тр}$ - скорость охлаждения на транспортере.

Таблица 4 – Расчетное влияние колебаний содержания химических элементов в стали и параметров прокатки на отклонения механических свойств катанки диаметром 5,5 мм из стали марки SAE 1006

Наименование параметров	Экспериментальные данные		Расчетные данные					
	Среднее значение	Среднее квадратическое отклонение	Среднее квадратическое отклонение			Доля влияния параметра, %		
			σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ_5 , %	σ_T	σ_B	δ_5
C, %	0,063	0,010	5,4	6,6	0,55	44,3	55,9	42,0
Mn, %	0,363	0,018	1,6	1,8	0,15	13,1	15,3	11,5
Si, %i	0,078	0,013	0,9	1,1	0,10	7,4	9,3	7,6
R_p , мм	5,5	0,05	0,7	0,5	0,36	5,7	4,2	27,5
ε (отн.)	0,8	0,01	0,3	0,3	0,03	2,5	2,5	2,3
$T_{кп}$, °C	1080*	8,3*	1,7	0,8	0,06	13,9	6,8	4,6
$T_{во}$, °C	930	8,7						
$\alpha_{тр}$, °C/с	2,2*	0,06*	1,6	0,7	0,06	13,9	6,8	4,6
σ_T , Н/мм ²	287	16,6	9,8	-	-			
σ_B , Н/мм ²	410	14,8	-	9,4	-			
ψ , %	71,2	3,0	-	-	1,1			
Примечание. * - Расчетные значения								

Результаты расчетов показали, что наибольшее влияние на разброс механических свойств катанки оказывают колебания значений следующих параметров:

- содержания углерода в стали;
- содержания марганца в стали;
- температуры конца прокатки и температуры за виткообразователем;
- радиуса проката;
- средней скорости охлаждения на транспортере.

При этом колебания температуры за виткообразователем определяется, главным образом, колебаниями температуры конца прокатки, а также эффективностью последеформационного охлаждения водой, которая зависит, в основном, от колебаний температуры и давления воды, а также степени засорения устройств подачи воды. Колебания скорости охлаждения на транспортере зависит от колебаний температуры за виткообразователем, а также температуры воздуха, состояния

вентиляторов и экранов (крышек), а так же колебаний плотности укладки витков.

Выводы.

1. Разработан и проверен метод аналитического исследования формирования нестабильности механических свойств горячекатаного проката (полосового, арматурного и катанки).

2. Проведенные аналитические исследования, которые показали, что на различных прокатных станах и различном сортаменте проката перечень влияющих на стабильность механических свойств факторов и их значимость изменяются.

3. Предложенный подход и результаты выполненных исследований позволяют разрабатывать технические и технологические решения, направленные на увеличение стабильности показателей качества проката.

1. *Антипин В.Г.* Задачи металлургической науки в современных условиях //Сталь. -1990. - № 10. – С. 1-4.
2. *Кермель А.* Компьютерная система управления технологическим процессом прокатки на сортовом стане / А. Кермель, П. Тивен // Металлургическое производство и технология. – 2012. - № 2. – С. 32-38.
3. Шейхи Ш. Развитие производства плоского стального проката / Ш. Шейхи, А. Ангербауэр, К.-Д. Вуппермен // Черные металлы. – 2010. - № 1. – С. 30-38.
4. *Бобих П.* Тенденции развития технологии и оборудования для производства высококачественной полосовой стали / П. Бобих, Р. Борси, М. Ротти // Тр. Четвертого конгресса прокатчиков. – М.: АО Черметинформация. – 2002. – С. 54-57.
5. *Мазур В.Л.* Первоочередные задачи и пути их решения при модернизации листопрокатных мощностей Украины / В.Л. Мазур, А.К. Голубченко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – №2. – С. 1-5.
6. *Развернутое* математическое моделирование основных показателей качества горячекатаных полос / Н.А. Кулик, А.А. Файчак, С.С. Настоящая, П.Л. Жуков // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2009. – № 1 (20). – С. 84–88.
7. *Математическое* моделирование формирования микроструктуры и свойств стали 08кп в объеме горячекатаных тонких полос / А.А. Миленин, В.Н. Данченко, А.Ю. Путноки, В.Т. Тилик // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – №1. – С. 40-45.
8. *Кашаев В.В.* Исследование влияния температуры на процесс прокатки катанки / В.В. Кашаев, О.Л. Дронов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ - Слов'янськ: ДДМА, 2003.- С. 41-43.
9. *Надежность* технологического процесса производства листового проката / [В.Л. Мазур, С.А. Воробей, Д.Л. Романовский и др.] - К.: Техніка, 1992. – 170 с.
10. *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.

*Статья поступила в редакцию сборника 15.02.2017
и прошла внутреннее и внешнее рецензирование*

С.О.Воробей, В.Г.Раздобреєв, Д.Г.Паламар

Метод оцінки впливу технологічних факторів на стабільність механічних властивостей гарячекатаного прокату

Представлено аналіз причин формування нестабільності механічних властивостей гарячекатаних смуг, арматурного прокату і катанки. Для аналізу використано розроблену раніше математичну модель формування структури і механічних властивостей гарячекатаного прокату. Показано, що перелік факторів, що впливають на стабільність механічних властивостей, і їхня значимість змінюються на різних прокатних станах і різному сортаменті прокату. Результати виконаних досліджень дозволяють розробляти технічні і технологічні рішення, спрямовані на збільшення стабільності показників якості прокату.

Ключові слова: гарячекатана смуга, арматурний прокат, катанка, стабільність механічних властивостей

S.A.Vorobey, V.G.Razdobreev, D.G.Palamar

The estimation method to determine the influence of the factors in hot-rolled metal production technology on the stability of the mechanical properties

The analysis of the reasons why hot-rolled strips reinforcing bars and wire rods show instability in their mechanical properties. In the course of the analysis, the earlier developed mathematical model on formation of the said hot-rolled structures and mechanical properties has been applied for this reason. This paper gives the list of the factors influencing the stability of the mechanical properties and shows that their values are variable depending on the differences in rolling mills and differences in rolled stock product range. The results achieved with the reported work enable further developments e.g. in relation to engineering and production solutions aiming at the stability enhance in the rolled stock quality.

Keywords: hot-rolled strip, reinforcing bar, wire rod, stability of mechanical properties