ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.789

Шубин И.Г., Румянцев М.И., Торопицина У.А., Демидова О.О.

ВЫБОР ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ОТОБРАЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ХИМСОСТАВА СТАЛИ НА ПОКАЗАТЕЛИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И МИКРОСТРУКТУРЫ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ КАНАТНОЙ КАТАНКИ

Технологический процесс производства катанки должен обеспечить стабильность воспроизводства заданного комплекса показателей качества при ее массовом изготовлении. Для достижения указанной цели важное значение имеет модель взаимосвязи показателей качества с технологическими факторами процесса, построение которой включает разработку системы уравнений регрессии.

Комплекс показателей качества высокоуглеродистой канатной катанки включает характеристики механических свойств (относительное сужение ψ, относительное удлинение δ_{10}, временное сопротивление разрыву σ_B) и микроструктуры (количество пластинчатого перлита 1 балла $Б_m$, величина обезуглероженного слоя Δ_{CO}). Как известно [1, 2 и др.], к факторам, влияющим на изменение показателей качества, и в том числе указанных, относятся температурный и скоростной режимы прокатки, режим нагрева заготовок и охлаждения готовой катанки, способ выплавки и разливки стали, а также ее химический состав.

Необходимость учета химсостава стали как фактора свойств проката усложняет задачу, т. к. одним из условий обеспечения высокой точности множественной аппроксимации является отсутствие корреляции между параметрами, включенными в уравнение [3]. Однако на практике между массовыми долями различных элементов существуют значимые корреляционные связи. Так, для катанки из стали, полученной способом ДСА (мартеновская печь), наблюдается значимая корреляция (**табл**. 1) временного сопротивления раз-

Таблица 1

Матрица корреляции для катанки, прокатанной из стали, полученной способом ДСА

	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	N_2	Al	Ti	As	Mo	V	W	$\sigma^в$	δ^{10}	ψ	co	$Б^{пп}$
C	1																			
Si	0,164	1																		
Mn	0,020	-0,066	1																	
S	-0,257	-0,330	0,276	1																
P	-0,258	-0,074	-0,067	0,258	1															
Cr	-0,233	-0,035	-0,248	0,120	0,239	1														
Ni	0,066	0,064	0,050	0,019	-0,014	0,244	1													
Cu	0,002	0,164	-0,083	-0,042	0,150	0,112	0,466	1												
N_2	0,069	-0,006	0,177	0,111	0,086	0,030	0,138	0,203	1											
Al	0,035	0,206	0,072	-0,138	-0,095	-0,074	0,058	0,006	-0,149	1										
Ti	0,269	0,374	-0,218	-0,450	-0,044	-0,052	-0,038	-0,104	-0,159	0,218	1									
As	-0,109	-0,200	0,077	0,323	0,429	0,106	0,009	0,105	0,257	-0,245	-0,151	1								
Mo	0,068	0,060	-0,112	-0,295	-0,094	-0,048	-0,062	-0,088	-0,173	0,106	0,448	-0,095	1							
V	0,190	0,125	-0,217	-0,299	-0,055	-0,037	-0,071	-0,124	-0,116	0,029	0,426	-0,089	0,393	1						
W	0,001	-0,022	-0,077	0,011	-0,020	-0,038	-0,042	-0,012	-0,021	0,067	0,135	-0,041	0,679	0,250	1					
$\sigma_в$	0,824	0,202	0,036	-0,225	-0,166	-0,198	0,041	0,015	0,062	0,043	0,294	0,037	0,063	0,239	-0,008	1				
δ_{10}	-0,613	-0,063	-0,052	0,125	0,103	0,115	-0,057	0,020	-0,071	-0,092	-0,178	-0,094	-0,080	-0,126	0,003	-0,578	1			
ψ	-0,693	0,077	0,049	0,037	0,132	0,008	-0,113	-0,089	-0,120	-0,009	-0,049	-0,139	0,008	-0,032	0,004	-0,554	0,602	1		
Δ_{co}	-0,162	-0,051	0,012	0,132	0,073	0,026	0,009	0,071	0,042	-0,143	-0,010	0,063	-0,057	-0,068	-0,028	-0,202	0,024	0,044	1	
$Б_{пп}$	0,366	0,031	-0,013	-0,090	-0,169	-0,183	-0,033	-0,184	-0,122	-0,024	0,135	-0,077	0,143	0,000	0,060	0,297	-0,222	-0,219	-0,129	1

Примечания: 1.Число наблюдений n=618.

2. Минимальный статистически значимый коэффициент корреляции с доверительной вероятностью 99,9% rmin=0,132.

рыву с углеродом, кремнием, серой, фосфором, хромом и титаном. В то же время массовая доля, например хрома, имеет статистически значимые связи с долями углерода, марганца и фосфора. Для катанки из стали, полученной способом ДСП (электросталеплавильный агрегат), количество пластинчатого перлита зависит (**табл**. 2) от содержания углерода, фосфора и алюминия, а массовая доля последнего имеет значимую корреляцию с долями и углерода, и фосфора.

Проблему значимой корреляции между параметрами, включаемыми в уравнение множественной регрессии для отображения влияния химсостава на свойства проката, можно преодолеть применением так называемого углеродного эквивалента. Углеродный эквивалент является, по существу, комплексной характеристикой химсостава, которая одним числом характеризует влияние сразу нескольких элементов. Применительно к производству катанки в литературе [4–7] упоминаются следующие углеродные эквиваленты:

$$C_{э1} = C + Mn/5; \quad (1)$$

$$C_{э2} = C + Mn/5 + Si/7 + (Cr + Ni + Cu)/12; \quad (2)$$

$$C_{э3} = C + Mn/6 + Si/24 + Cr/5 + Ni/40 + \\ +Cu/13 + V/14 + P/2; \quad (3)$$

$$C_{э4} = C + Mn/6 + (Cr + V + Mo)/5 + \\ +(Cu + Ni)/15; \quad (4)$$

$$C_{э5} = C + Mn/6 + Si/10; \quad (5)$$

$$C_{э6} = C + 0,3*Mn + 0,12. \quad (6)$$

Комплексная характеристика химсостава в виде углеродного эквивалента или подобного ему показателя должна включать те элементы, которые значимо влияют на изучаемое свойство проката. С этой точки зрения в показателях (1)–(6), во-первых, используются элементы, которые, как следует из **табл**. 1 и 2, не оказывают значимого влияния на свойства и микроструктуру канатной катанки. Во-вторых, в них отсутствуют элементы, влияние которых можно расценить как значимые. Для разработки альтернативных комплексных характеристик химсостава применили подход, предложенный в [8]. Суть его состоит в том, что такую характеристику целесообразно разрабатывать на основе показателя Неймарк [9] с учетом только тех компонентов химсостава, влияние которых на показатели качества продукции является статистически значимым. В общем случае формулу для расчета характеристики X_Y влияния химсостава на показатель качества Y можно записать следующим образом:

$$X_Y = K_M \sum_{j=1}^{m} \frac{X_j}{A_j},$$

где X_j и A_j – массовая доля и атомный вес элемента, для которого обнаружена значимая корреляционная связь с показателем качества; m – число элементов, проявляющих значимую корреляционную связь; K_M – масштабный коэффициент. Принимается равным 1, 10 или 100.

Получили следующие уравнения в зависимости от способа производства стали (ДСП, ДСА):

$$X_{\sigma_в}^{ДСА} = 0,833C + 0,356Si + 0,312S + \\ +0,323P + 0,192Cr + 0,196V + 0,209Ti; \quad (7)$$

$$X_{\delta_{10}}^{ДСА} = 0,833C + 0,209Ti; \quad (8)$$

$$X_{\psi}^{ДСА} = 0,833C + 0,323P + 0,133As; \quad (9)$$

Таблица 2

Матрица корреляции для катанки, прокатанной из стали, полученной способом ДСП

	C,%	Si,%	Mn,%	S,%	P,%	Cr,%	Ni,%	Cu,%	N_2,%	Al,%	As,%	$s^{в,\%}$	$Б^{пп}$,%	co,%	*y*,%	d^{10},%
C,%	1															
Si,%	0,002	1														
Mn,%	0,045	-0,247	1													
S,%	-0,175	0,074	-0,115	1												
P,%	0,078	-0,129	0,279	0,108	1											
Cr,%	0,041	-0,055	0,157	0,029	0,398	1										
Ni,%	-0,007	0,040	-0,001	0,036	-0,001	0,416	1									
Cu,%	0,035	-0,021	0,144	-0,018	0,042	0,465	0,759	1								
N^2,%	0,248	0,164	-0,230	-0,081	-0,109	-0,304	0,023	-0,166	1							
Al,%	0,167	0,032	0,042	-0,078	-0,212	-0,121	0,134	0,303	0,024	1						
As,%	-0,101	0,191	-0,164	0,179	-0,143	-0,493	-0,013	-0,223	0,414	-0,009	1					
$s^{в,\%}$	0,793	0,093	0,001	-0,202	0,129	0,009	0,069	0,037	0,251	0,095	0,089	1				
$Б^{пп}$,%	0,313	-0,038	0,078	-0,082	0,158	0,102	-0,028	0,102	0,070	0,158	-0,063	0,282	1			
co,%	-0,082	-0,080	0,044	0,053	0,268	-0,081	-0,091	-0,077	0,070	-0,010	0,071	-0,072	-0,054	1		
y,%	-0,616	-0,076	0,093	-0,020	0,044	0,327	0,059	0,139	-0,411	-0,157	-0,254	-0,656	-0,201	0,005	1	
d^{10},%	-0,515	-0,025	-0,029	0,038	-0,067	0,015	0,005	-0,023	-0,109	-0,126	0,009	-0,642	-0,218	0,038	0,509	1

Примечания: 1. Число наблюдений n=479.

2. Минимальный статистически значимый коэффициент корреляции с доверительной вероятностью 99,9% rmin=0,149.

$$X^{ДСА}_{\Delta_{СО}} = 0,833C + 0,312S + 0,383Al; \quad (10)$$

$$X^{ДСА}_{Б_{ПП}} = 0,833C + 0,323P + 0,192Cr + \\ +0,157Cu + 0,209Ti + 0,104Mo; \quad (11)$$

$$X^{ДСП}_{\sigma_в} = 0,833C + 0,312S + 0,714N_2; \quad (12)$$

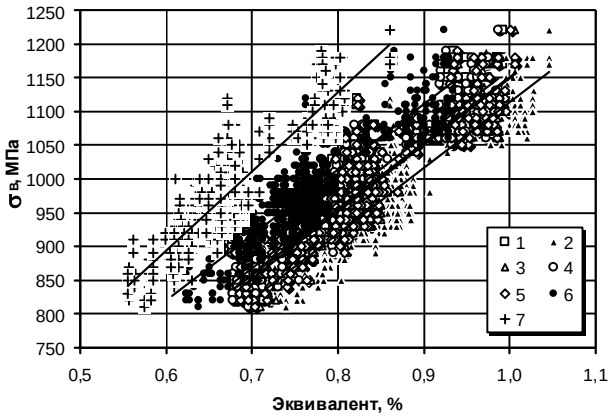
$$X^{ДСП}_{\delta_{10}} = 0,833C; \quad (13)$$

$$X^{ДСП}_{\psi} = 0,833C + 0,192Cr + \\ +0,714N_2 + 0,383Al + 0,133As; \quad (14)$$

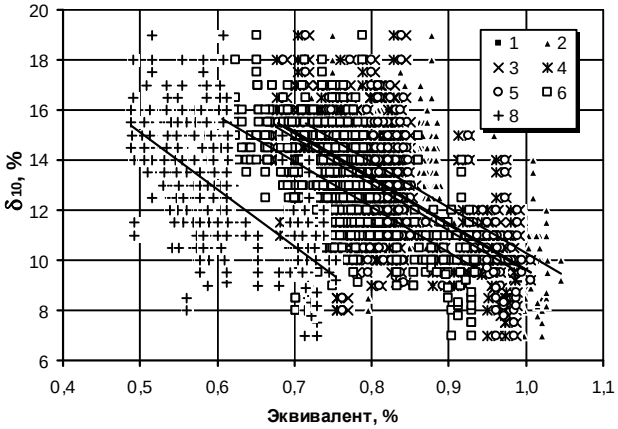
$$X^{ДСП}_{\Delta_{СО}} = 32,3P; \quad (15)$$

$$X^{ДСП}_{Б_{ПП}} = 0,833C + 0,323P + 0,383Al. \quad (16)$$

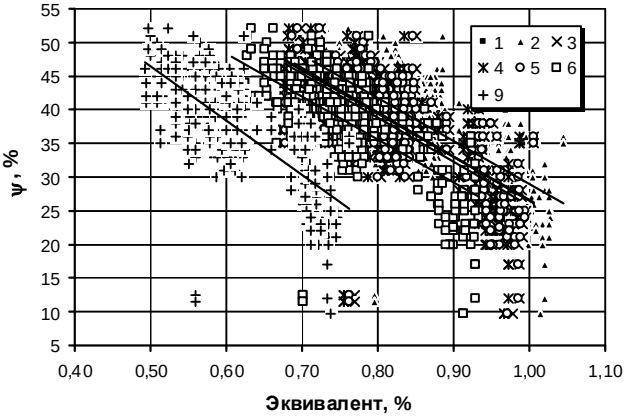
При выводе зависимости (15) приняли мас-



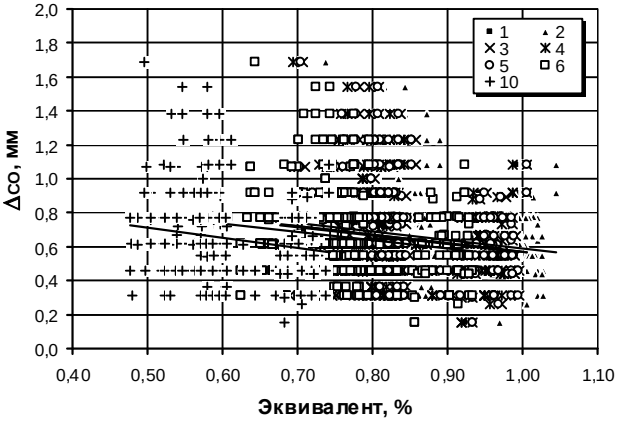
а



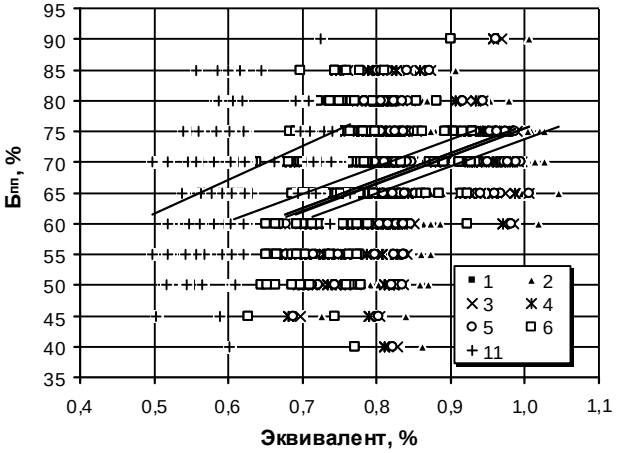
б



в



г



д

Рис. 1. Влияние характеристик химсостава на показатели механических свойств и микроструктуры катанки из стали, полученной способом ДСА:
1, 2, 3, 4, 5, и 6 – **углеродные эквиваленты, рассчитанные по формулам** (1)-(6) **соответственно**; 7, 8, 9, 10 и 11 – **характеристики, рассчитанные по формулам** (7)-(11) **соответственно**

штабный коэффициент K_M=100, в остальных случаях K_M =10.

Все характеристики химсостава влияют на исследуемые показатели качества одинаковым образом. И для катанки из стали, полученной способом ДСА (**рис**. 1), и для катанки из стали, полученной способом ДСП (**рис**. 2) их увеличение приводит к возрастанию временного сопротивления и к снижению показателей пластичности (δ_{10} и ψ). И в том, и в другом случае при возрастании характеристик химсостава наблюдается тенденция к увеличению доли пластического перлита, но практически не изменяется величина обезуглероженного слоя.

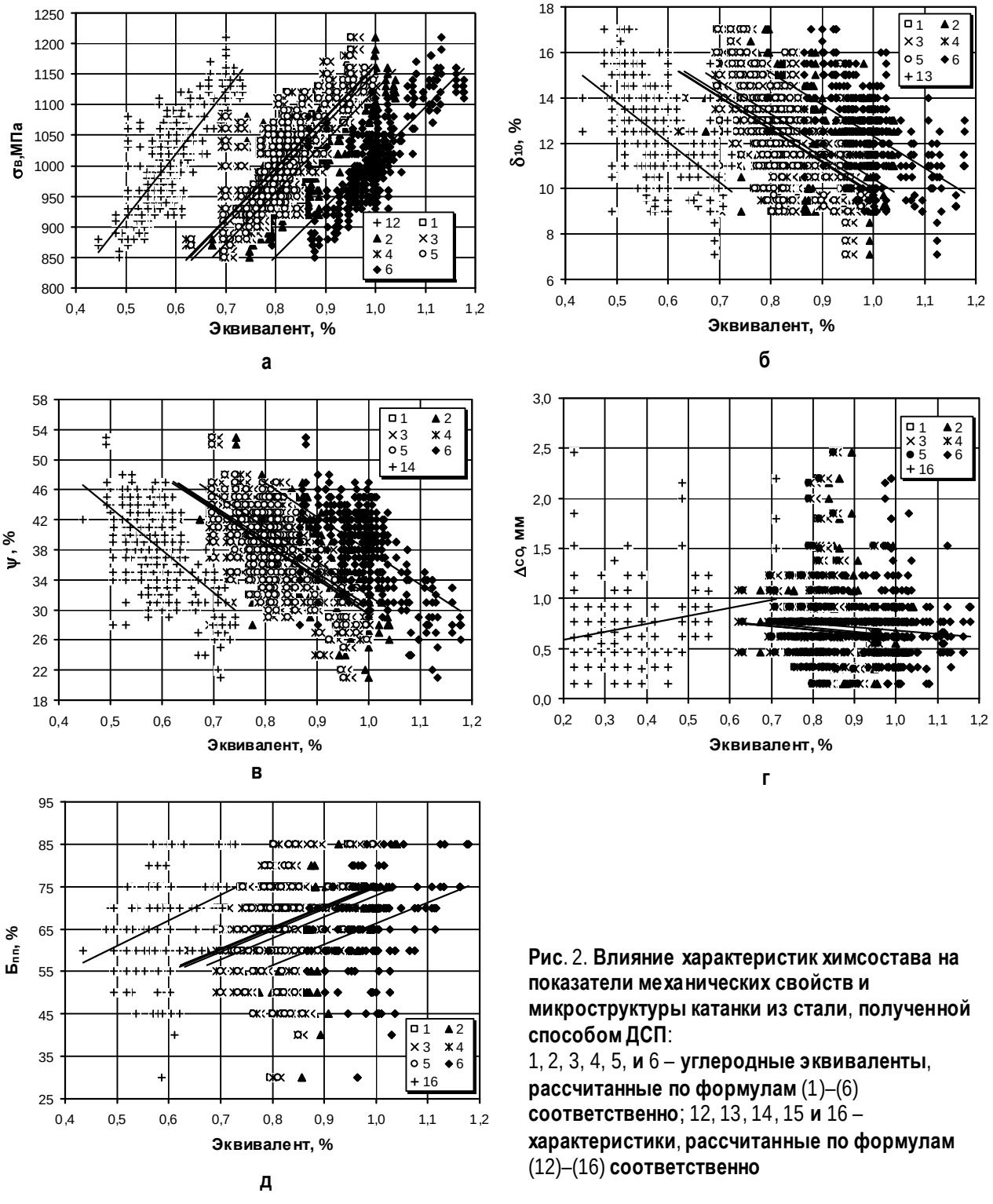


Рис. 2. **Влияние характеристик химсостава на показатели механических свойств и микроструктуры катанки из стали, полученной способом ДСП**:
1, 2, 3, 4, 5, **и** 6 – **углеродные эквиваленты, рассчитанные по формулам** (1)–(6) **соответственно**; 12, 13, 14, 15 **и** 16 – **характеристики, рассчитанные по формулам** (12)–(16) **соответственно**

Чтобы сравнить, насколько полно та или иная характеристика учитывает влияние химсостава на показатели качества, рассчитали значения коэффициента достоверности аппроксимации R^2 для соответствующих парных линейных зависимостей. С доверительной вероятностью 95% значимость R^2 наблюдается только для показателей механических свойств (**табл**. 3).

По сравнению с углеродными эквивалентами (1)–(6) предлагаемые характеристики в качестве факторов, как правило, дают более высокие значения R^2. И хотя указанное различие находится в пределах 1,5–6,3%, можно считать, что они более точно отображают влияние элементов химсостава на показатели качества катанки. Кроме того, в пользу применения разработанных характеристик свидетельствует и тот факт, что они включают именно те элементы химсостава, которые присутствуют в данных марках стали и оказывают значимое влияние на свойства и микроструктуру канатной катанки.

Таблица 3

Оценка точности описания влияния химсостава на показатели качества

Характеристика химсостава	Коэффициент достоверности аппроксимации R^2					
	ДСП			ДСА		
	σ_B, МПа	δ_{10}, %	ψ, %	σ_B, МПа	δ_{10}, %	ψ, %
X	0,6411	0,2641	0,3387	0,6824	0,3791	0,4888
$Сэ_1$	0,6154	0,2676	0,3548	0,6754	0,3764	0,4673
$Сэ_2$	0,6213	0,2633	0,3405	0,6791	0,3736	0,4584
$Сэ_3$	0,6163	0,2614	0,3250	0,6801	0,3780	0,4730
$Сэ_4$	0,6138	0,2608	0,3271	0,6770	0,3774	0,4755
$Сэ_5$	0,6249	0,2664	0,3629	0,6792	0,3749	0,4609
$Сэ_6$	0,6004	0,2594	0,3394	0,6693	0,3745	0,4579

Использование разработанных характеристик повысит точность создаваемой модели взаимосвязи показателей качества с технологическими факторами процесса производства канатной катанки.

Библиографический список

1. Матвеев Б.Н. Методы повышения качества сорта и катанки // Производство проката. 2001. № 1. С. 40–47.
2. Исследование качества катанки, прокатанной на стане 150 с использованием низкотемпературного блока клетей / Горбанев А.А., Юнаков А.М., Шарф Й. и др. // Производство проката. 2000. № 2. С. 20–27.
3. Четыркин Е.М., Калихман И.Л. Вероятность и статистика. М.: Финансы и статистика, 1982. 318 с.
4. Формирование оптимальной микроструктуры в высокоуглеродистой катанке / Парусов В.В., Сычков А.Б., Жигарев М.А., Перчаткин А.В. // Сталь. 2005. № 1. С. 82–85.
5. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия: ГОСТ 19281-89. М.: Стандартинформ, 1989. С. 18.
6. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия: ГОСТ 5781-82. М.: Стандартинформ, 1982. С. 16.
7. Прокат периодического профиля из арматурной стали: СТО-АСЧМ 7-93. Магнитогорск, 1993. С. 28.
8. Румянцев М.И, Цепкин А.С., Чернусь П.С. Возможности совершенствования технологии производства жести электролитического лужения на основе учета возмущений химического состава стальной основы // Материалы 62-й научно-технической конференции по итогам НИР за 2002–2003 гг. Т. 1 / Под ред. Г.С. Гуна. Магнитогорск: МГТУ, 2003. С. 46–48.
9. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справочник / Под ред. Б.Е. Неймарк. М.; Л.: Энергия, 1967. 240 с.

УДК 621.771.63

Солодова Е.М., Шемшурова Н.Г., Локотунина Н.М.

ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ ПРОФИЛЯ ОБШИВЫ ГРУЗОВОГО ПОЛУВАГОНА

В последние годы состояние транспортных средств подходит к критическому уровню: зачастую вагоны не отвечают запросам потребителей по механическим и геометрическим характеристикам, грузоподъемности, скорости доставки, трудоемкости погрузочно-разгрузочных работ.

В значительной мере в вагоностроении используются профили высокой жесткости (ПВЖ) – листовые профили с периодически повторяющимися продольными или поперечными гофрами, характеризующиеся высокой конструктивной готовностью и низкой материалоемкостью. Они являются важными деталями конструкции грузовых полувагонов производства ФГУП «ПО Уралвагонзавод».

Основным недостатком ПВЖ с продольными гофрами является пониженная жесткость в поперечном направлении. Для повышения жесткости в обоих направлениях предложено наносить и продольные, и поперечные гофры на одно и то же место заготовки, такие профили получили