

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ОТ ТЕМПЕРАТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Д. В. Лаухин д. т. н.

*ГВУЗ «Приднепровская государственная академия
строительства и архитектуры»*

Введение. Увеличение объемов производства любой продукции приводит к накоплению больших массивов данных зависимостей комплекса эксплуатационных характеристик от параметров производства. Эти данные бесценны с точки зрения анализа качества продукции. Как следствие, применение статистической обработки накопленных заводскими лабораториями массивов данных позволило бы скорректировать технологические режимы производства и, как следствие, повысить качество выпускаемой продукции.

Цель статьи. Получение эмпирических зависимостей механических свойств металлопроката (σ_T , σ_B , δ_5) от температуры конца горячей деформации толстого листа из низкоуглеродистых микролегированных сталей.

Материал методика. В работе проанализированы массивы данных (σ_T , σ_B , δ_5 в зависимости от температуры конца горячей прокатки), полученные с заводского контроля технологических процессов производства толстого листа из низкоуглеродистых низколегированных сталей СтЗпс, 09Г2С, 09Г2ФБ.

Основную задачу статистической обработки результатов эксперимента можно сформулировать следующим образом: необходимо получить некоторое представление о функции отклика факторов, которую можно аналитически представить в виде математической модели:

$$M(y) = f(x_1, x_2 \dots x_n), \quad (1)$$

где: y - функция отклика (зависимая переменная, в рассматриваемом случае σ_T , σ_B , или δ_5), $x_1 \dots x_n$ - независимые переменные (в нашем случае используется одна независимая переменная – температура конца горячей деформации ТЧЕРН), n – объем выборки (количество экспериментальных точек) [1].

Следовательно, задача заключается в нахождении зависимости результата (выхода) процесса (y) от параметров ($x_1 \dots x_n$). Предполагается, что функция отклика непрерывна, дифференцируема дважды и имеет не более одного экстремума.

В общем случае, исследование процесса ведется при недостаточно полном знании механизма изучаемых явлений. Вид зависимости в этом случае не известен и для решения такого типа задач необходимо определить аппроксимирующую функцию. Авторы работ [1-3] рекомендуют, в таком случае выбирать аппроксимирующую функцию в виде полинома n -й степени.

В общем случае процесс нахождения функции отклика (т. е. построение математической модели) можно провести в несколько этапов [2]:

- предварительная обработка массивов экспериментальных данных;
- корреляционный анализ;

- регрессионный анализ и нахождение регрессионной модели.

Предварительная обработка массивов экспериментальных данных необходима для того, чтобы в дальнейшем при построении эмпирических зависимостей с наибольшей эффективностью использовать статистические методы, корректно анализировать полученные результаты, отсеять грубые ошибки и оценить достоверность результатов измерений [3]. Другой важной задачей предварительной обработки данных является проверка соответствия результатов измерений функции отклика нормальному распределению (распределению Гаусса) и определение параметров этого распределения [4].

Основной задачей корреляционного анализа является:

- установление наличия связи между функцией отклика и факторами;
- определение силы связи между зависимыми и независимыми переменными (расчет коэффициента корреляции) [5].

Основной задачей регрессионного анализа является установление аналитической зависимости между переменными [6]. Итогом регрессионного анализа является получение уравнения регрессии - математического уравнения, описывающего форму зависимости между признаками, связанными между собой.

Построение регрессионной модели проводится в несколько этапов:

- выбор типа аппроксимирующей кривой исходя из ее соответствия физической природе изучаемого явления или имеющихся представлений об особенностях поведения исследуемой величины [2];
- расчет коэффициентов уравнения регрессии, который производится методом наименьших квадратов [2-6];
- оценка адекватности модели – включает в себя уточнение коэффициентов регрессии, например, квазиньютоновским методом.

Корреляционные поля зависимостей предела текучести, предела прочности и относительного удлинения от температуры конца горячей деформации для исследуемых марок сталей приведены в работе [8].

Отсевание ошибок измерений производили на основе критерия Диксона. Доверительный интервал для среднего рассчитывали на основании правила «трех сигма» [2]. Данные статистической обработки приведены в табл. 1.

Анализ полученных зависимостей и данных табл. 1 показывают, что исследуемые функции отклика имеют стохастический характер и, как следствие, слабую связь между зависимой и независимой переменными.

Дисперсия и среднее квадратичное отклонение показывают величину разброса функции отклика относительно математического ожидания (в качестве математического ожидания принято среднее значение зависимой переменной). Для всех анализируемых случаев дисперсия и среднее квадратичное отклонение не превышают требуемых параметров [7].

Количество интервалов (столбцов гистограммы) рассчитывалось на основании формулы Стерджесса [3]. Линией на гистограммах показана теоретически рассчитанная кривая нормального распределения [8].

Анализ гистограмм показывает, что все исследуемые функции имеют распределения, близкие к нормальному, что позволяет осуществлять построение регрессионной модели без дополнительных математических преобразований анализируемых величин.

«Стародубовские чтения - 2014»

В качестве внешнего вида функции отклика (уравнения регрессии) для всех рассматриваемых случаев был выбран полином степени n .

Таблица 1

Результаты первичной статистической обработки массивов экспериментальных данных

Марка стали	Среднее значение	Min	Max	Доверительный интервал с вероятностью 95 %		Размах	Дисперсия	Ср. кв. отклонение	Станд. ошибка	Экцесс	Коэффициент согласия
Предел текучести (σ_T, МПа)											
Ст3пс	289,6	260	330	286,9	292,4	70	237,3	15,4	1,39	-0,05	0,12
09Г2С	379,0	340	430	376,8	381,2	90	355,8	18,8	1,12	-0,38	0,13
09Г2ФБ	542	490	610	540,6	544	120	399,9	20	0,88	0,07	0,10
Предел прочности (σ_B, МПа)											
Ст3пс	447	410	475	444,7	450,2	65	232,4	15,2	1,39	-0,25	0,1
09Г2С	514	480	550	511,7	515,4	70	244,6	15,6	0,93	-0,38	0,15
09Г2ФБ	636	590	700	634,7	638,3	110	442,8	21,0	0,92	-0,01	0,10
Относительное удлинение (δ_5, %)											
Ст3пс	31	27	34	30,2	30,9	7	4,0	2,0	0,18	-0,87	0,11
09Г2С	30	26	34	29,7	30,2	8	4,5	2,1	0,13	-0,59	0,14
09Г2ФБ	21	18	25	21,1	21,3	7	1,1	1,1	0,05	0,25	0,12

Предварительный расчет показал, что все коэффициенты уравнения при степенях выше 2-й являются бесконечно малыми величинами (порядок величины – 10⁻⁷...-11 и ниже) и ими можно пренебречь. В связи с этим при дальнейшей разработке регрессионной модели использовался полином 2-й степени. Результаты проведенного регрессионного анализа приведены в таблице 2.

Таблица 2

Полученные регрессионные модели для исследуемых параметров

Марка стали	Вид уравнения регрессии	Коэф. уравнения регрессии		
		b0	b1	b2
Предел текучести				
Ст3пс	$\sigma_T = b_0 + b_1 \cdot T_{чep} + b_2 \cdot T_{чep}^2$	36,53590	0,412716	-0,000161
09Г2С	$\sigma_T = b_0 + b_1 \cdot T_{чep} + b_2 \cdot T_{чep}^2$	1521,577	-2,28035	0,001136
09Г2ФБ	$\sigma_T = b_0 + b_1 \cdot T_{чep} + b_2 \cdot T_{чep}^2$	-69,3118	1,213431	-0,000600
Предел прочности				
Ст3пс	$\sigma_B = b_0 + b_1 \cdot T_{чep} + b_2 \cdot T_{чep}^2$	-166,679	1,139237	-0,000526
09Г2С	$\sigma_B = b_0 + b_1 \cdot T_{чep} + b_2 \cdot T_{чep}^2$	705,7370	-0,37055	0,000178
09Г2ФБ	$\sigma_B = b_0 + b_1 \cdot T_{чep} + b_2 \cdot T_{чep}^2$	1142,592	-1,06138	0,000556
Относительное удлинение				
Ст3пс	$\delta_5 = b_0 + b_1 \cdot T_{чep} + b_2 \cdot T_{чep}^2$	-67,2367	0,188987	-0,000091
09Г2С	$\delta_5 = b_0 + b_1 \cdot T_{чep} + b_2 \cdot T_{чep}^2$	-7,36520	0,073863	-0,000036
09Г2ФБ	$\delta_5 = b_0 + b_1 \cdot T_{чep} + b_2 \cdot T_{чep}^2$	88,50430	-0,136170	0,000069

Адекватность полученной модели проверяли согласно Квазинытоновскому методу остатков. Для чего, рассчитанные значения остатков наносили на нормальную вероятностную бумагу. На данных графиках линией показано нормальное распределение. Анализ зависимостей показывает, что остатки ложатся вблизи прямой со случайными отклонениями влево и вправо.

Следовательно, результаты расчета значений для всех описываемых функций отклика по полученной регрессионной модели соответствуют нормальному закону распределения. Таким образом, можно сделать вывод о том, что полученные регрессионные модели с вероятностью 95 % описывают зависимость функции отклика от температуры конца горячей деформации.

На основании полученных регрессионных моделей, были построены аналитические зависимости функций отклика (σ_T , σ_B , δ_5) от независимой переменной ($T_{\text{черн}}$), которые приведены на рисунке 1.

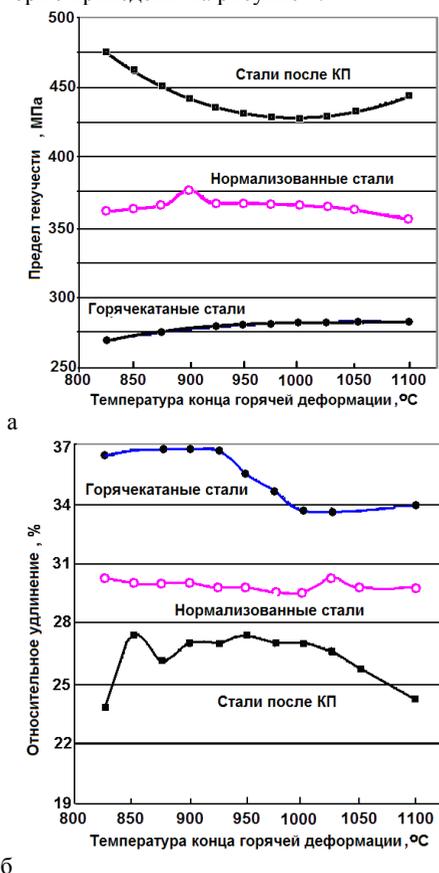


Рис. 1. Зависимость сгруппированных функций отклика от температуры конца горячей деформации.

Анализ данных показывает, что оптимальный комплекс свойств прочность-пластичность достигается при понижении температуры конца горячей деформации вплоть до температур полиморфного превращения.

Однако эксплуатация такого листа в конструкциях высотных зданий или большепролетных сооружений, где реализуются схемы нагружения более сложные, чем в нефтепроводных трубах, крайне опасна из-за высокой вероятности расслоения металла по толщине из-за анизотропии механических свойств в трех направлениях, вследствие формирования зоны осевой ликвации.

Выводы

1. Анализ изменения прочностных и пластических свойств сталей, прокатанных по различным режимам, показывает наибольшую эффективность понижения температуры горячей деформации для сталей произведенных по методу контролируемой прокатки.
2. При понижении температуры конца деформации в черновой клети наблюдается одновременное повышение прочностных и пластических характеристик вплоть до температуры полиморфного превращения, дальнейшее понижение температуры нецелесообразно из-за понижения пластических характеристик.
3. На основе анализа проведенных теоретических исследований показано, что для повышения и стабилизации прочностных и пластических характеристик необходимо производить коррекцию температурно-деформационных режимов прокатки уже на стадии предварительной горячей деформации в черновой клети.

Список использованных источников

- 1 Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. – М.: Мир, 1985. – 272с.
- 2 Математическая теория планирования эксперимента / Под. ред. С.М. Ермакова. – М.: «Наука», 1983. – 392 с.
- 3 Фадеев М.А. Элементарная обработка результатов эксперимента. Учебное пособие. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2002. – 108 с.
- 4 Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: «Наука», 1971. – 192 с.
- 5 Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 2000. — 383 с:
- 6 Розанов Ю. А. Случайные процессы. – М.: «Наука», 1979, – 184 стр.
- 7 ГОСТ Р ИСО 5479-2002 проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения.
- 8 Методика построения регрессионных моделей основных механических свойств толстолистового проката из низкоуглеродистых микролегированных сталей от температуры конца деформации // В.И. Большаков, А.В. Бекетов, Д.В. Лаухин и др. / Новини науки Придніпров'я. ДВНЗ «ПДАБА». – 2011. – № 1, 2. – С. 83-96.