

DOI: 10.31319/2519-8106.2(49)2023.293197
УДК 669.018.292:629.364.1

Лаухін Д.В.¹, доктор технічних наук, професор
Laukhin Dmytro, Doctor of technical sciences, professor
ORCID: 0000-0002-9842-499X
e-mail: laukhin.d.v@nmu.one

Бекетов О.В.², доктор технічних наук, доцент
Beketov Oleksandr, Doctor of technical sciences, associate professor
ORCID: 0000-0003-0664-0327
e-mail: beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua

Дадіверіна Л.М.¹, кандидат технічних наук, доцент
Dadiverina Liliia, Philosophy doctor, associate professor
ORCID: 0000-0003-4498-2184
e-mail: Dadiverina.L.N@nmu.one

Козечко В.І.¹, здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти
Kozechko Valentyn, PhD student
ORCID: 0000-0003-2370-1603
e-mail: trans-nafta@ukr.net

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро
Dnipro University of Technology, Dnipro

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, м. Дніпро
Prydniprovskya State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАСМОВ'ЯЗКУ МІЖ ТЕМПЕРАТУРОЮ КІНЦЯ ГАРЯЧОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТА КОМПЛЕКСОМ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЕЙ

STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE TEMPERATURE OF THE END OF HOT DEFORMATION AND THE COMPLEX OF MECHANICAL PROPERTIES OF LOW-CARBON LOW-ALLOY STEELS BASED ON THE ANALYSIS OF REGRESSION MODELS

У роботі розглянуто основні методики проведення статистичного аналізу масивів експериментальних даних. На підставі критеріїв теорії ймовірності та математичної статистики побудовані регресійні моделі залежностей механічних характеристик (границі плинності, граници міцності і відносного видовження) від температури кінця гарячої деформації. Проведена оцінка адекватності отриманих моделей за методом залишків. На підставі отриманих моделей побудовані графіки залежностей механічних характеристик від температури кінця гарячої деформації і здійснено їх аналіз.

Ключові слова: статистичний аналіз, регресійні моделі, гаряча деформація, мікролеговані сталі.

The paper discusses the basic techniques of statistical analysis of experimental data. Based on the criteria of probability and mathematical statistics, regression models were constructed dependences of mechanical characteristics (yield strength, tensile strength and percentage reduction) on the temperature of the end of hot deformation. An assessment of the adequacy of the obtained models by

the method of residues. But the basis of the models used to explore the dependence of mechanical properties on the temperature of the end of hot deformation and performed their analysis.

Keywords: *statistic analysis, regression models, hot deformation, microalloyed steels.*

Постановка проблеми

Збільшення обсягів виробництва будь-якої продукції призводить до накопичення великих масивів даних залежностей комплексу експлуатаційних характеристик параметрів виробництва. Ці дані безцінні з погляду аналізу якості продукції. Як наслідок, застосування статистичної обробки накопичених заводськими лабораторіями масивів даних дозволило б скоригувати технологічні режими виробництва і, як наслідок, підвищити якість продукції, що випускається.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є одержання емпіричних залежностей механічних властивостей металопрокату (σ_T , σ_B , δ_5) від температури кінця гарячої деформації товстого листа з низьковуглецевих мікролегованих сталей.

Матеріали та методики досліджень

У роботі проаналізовано масиви даних σ_T , σ_B , δ_5 залежно від температури кінця гарячої прокатки, отримані із заводського контролю технологічних процесів виробництва товстого листа з низьковуглецевих мікролегованих сталей СтЗпс, 09Г2С, 09Г2ФБ.

Виклад основного матеріалу

Теоретична частина. Основне завдання статистичної обробки результатів експерименту можна сформулювати математично наступним чином: необхідно отримати деяке уявлення про поверхню відгуку факторів, яку, у загальному випадку, можна аналітично подати у вигляді функції або математичної моделі:

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

де y — функція відгуку (залежна змінна, у цьому випадку σ_T , σ_B , чи δ_5) — незалежні змінні (y разі використовується одна незалежна змінна — температура кінця гарячої деформації $T_{\text{чорн}}$), — обсяг вибірки (кількість експериментальних точок) [1].

Отже, завдання полягає у знаходженні залежності результату (виходу) процесу (y) від параметрів ($x_1 \dots x_n$). Передбачається, що функція відгуку безперервна, що двічі диференціюється і має не більше одного екстремуму. У загальному випадку дослідження процесу ведеться при недостатньо повному знанні механізму досліджуваних явищ. Звичайно, вид функції в цьому випадку не відомий і для вирішення такого типу завдань необхідно визначити апроксимуючу функцію. Автори робіт [1—3] рекомендують, у такому разі, вибирати апроксимуючу функцію у вигляді полінома n -го ступеня.

У загальному випадку, процес знаходження функції відгуку (тобто побудова математичної моделі) можна провести в кілька етапів [2]:

- попередня обробка масивів експериментальних даних;
- кореляційний аналіз;
- регресійний аналіз та знаходження регресійної моделі.

Попередня обробка масивів експериментальних даних необхідна для того, щоб надалі при побудові емпіричних залежностей з найбільшою ефективністю використовувати статистичні методи, коректно аналізувати отримані результати, відсіяти грубі помилки та оцінити достовірність результатів вимірів [3]. Іншим важливим завданням попередньої обробки даних є перевірка відповідності результатів вимірювань функції відгуку нормального розподілу (розподілу Гауса) та визначення параметрів цього розподілу. Перевірка також виконується на основі критеріїв теорії ймовірності та математичної статистики [див. наприклад 4, 5].

Основним завданням кореляційного аналізу є:

- встановлення наявності зв'язку між функцією відгуку та факторами;
- визначення сили зв'язку між залежними та незалежними змінними (розрахунок коефіцієнта кореляції) [6].

Основним завданням регресійного аналізу є встановлення аналітичної залежності між змінними [7]. Основним підсумком регресійного аналізу є отримання рівняння регресії — математичного рівняння, що описує форму залежності між ознаками, пов'язаними між собою. Побудова регресійної моделі проводиться у кілька етапів:

- вибір типу апроксимуючої кривої, виходячи з її відповідності фізичній природі явища, що вивчається, або наявних уявлень про особливості поведінки досліджуваної величини [2];
- розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії, що виробляється методом найменших квадратів [2, 3, 6, 7];
- оцінка адекватності моделі — включає в себе уточнення коефіцієнтів регресії, наприклад квазиньютоновським методом, та оцінку розподілу залишків.

Експериментальна частина. Кореляційні поля залежностей границі плинності, границі міцності та відносного видовження температури кінця гарячої деформації для досліджуваних марок сталей наведені на рис. 1—3.

Попередня обробка даних. Відсіювання помилок вимірювань проводили на основі критерію Діксона. Довірчий інтервал для середнього розраховували виходячи з правила «трьох сигма» [2]. Дані статистичної обробки наведено у табл. 1.

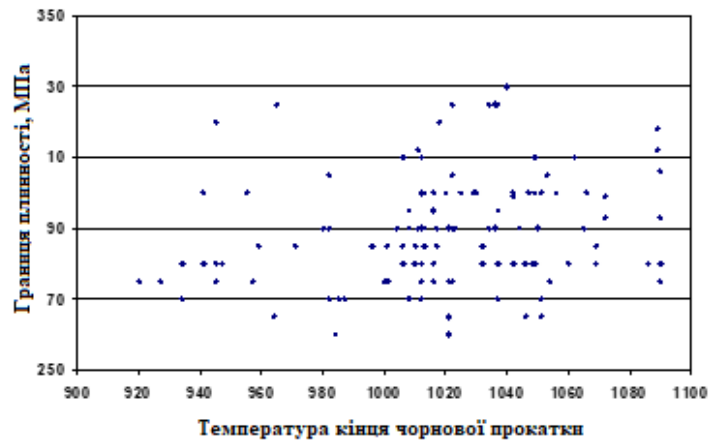
Таблиця 1. Результати попередньої обробки експериментальних значень

Марка сталі	Середнє значення	Min	Max	Довірчий інтервал із ймовірністю 95%		Розмах	Дисперсія	Середньоквадратичне відхилення	Стандартна помилка	Екссес	Коефіцієнт згоди
<i>Предел текучести (σ_T, МПа)</i>											
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
<i>Предел прочности (σ_B, МПа)</i>											
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	-0,003	0,10
<i>Относительное удлинение (δ_5, %)</i>											
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

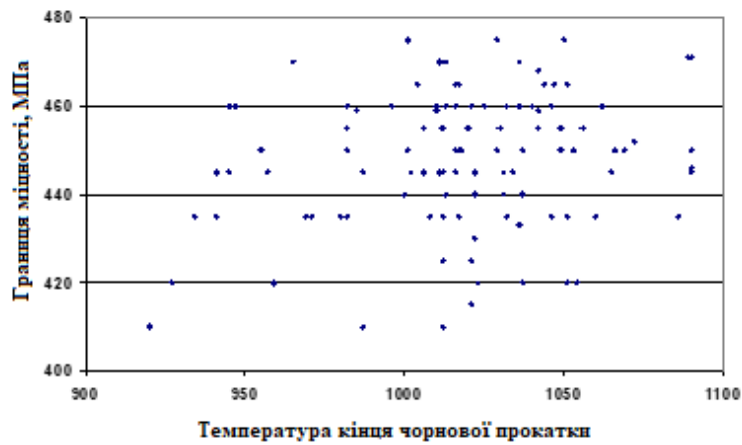
Аналіз рис. 1—3 та даних табл. 1 показує, що досліджувані функції відгуку мають стохастичний характер і слабкий зв'язок між залежною та незалежною змінними.

Дисперсія та середнє квадратичне відхилення показує величину розкиду функції відгуку щодо математичного очікування (як математичне очікування прийнято середнє значення залежної змінної). Для всіх аналізованих випадків дисперсія та середнє відхилення не перевищує необхідних параметрів [3].

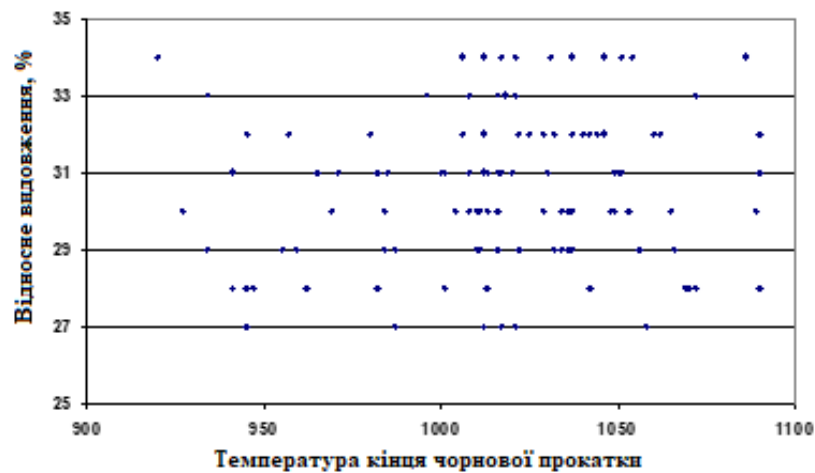
Гістограми розподілу функцій відгуку наведено на рис. 4—6. По осі ординат на гістограмах відкладено можливість потрапляння функції відгуку в діапазон значень, по осі абсцис — величина інтервалу. Кількість інтервалів (стовпців гістограми) розраховувалося виходячи з формули Стерджеса [3]. Лінією на гістограмах показано теоретично розраховану криву нормального розподілу.



а



б



в

Рис. 1. Залежність механічних властивостей сталі Ст3 від температури кінця чорнової прокатки: а — границі плинності, б — границі міцності, в — відносного видовження

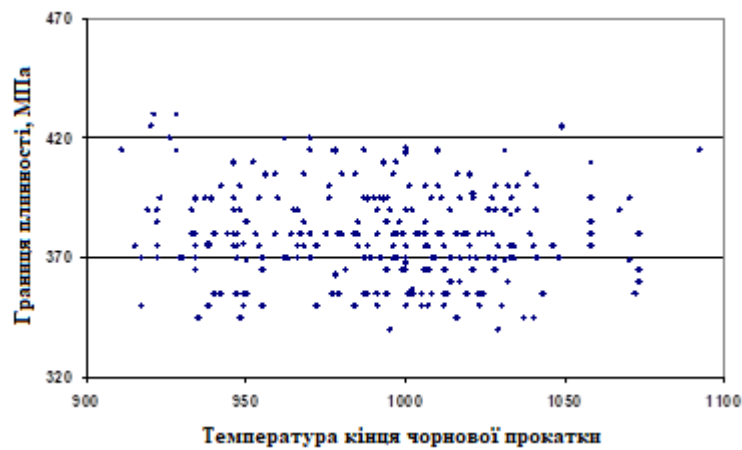
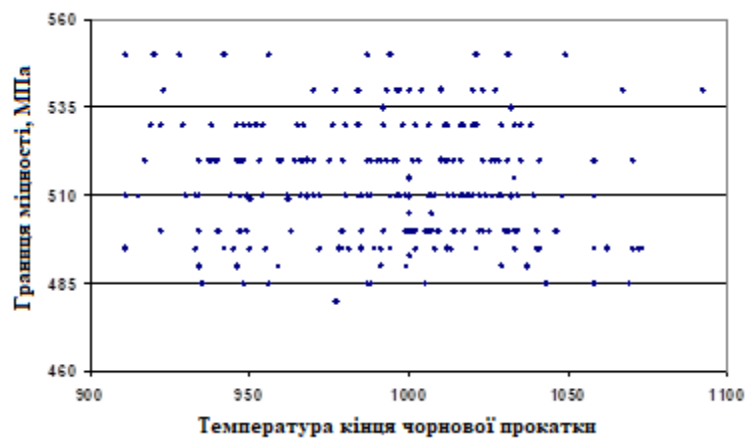
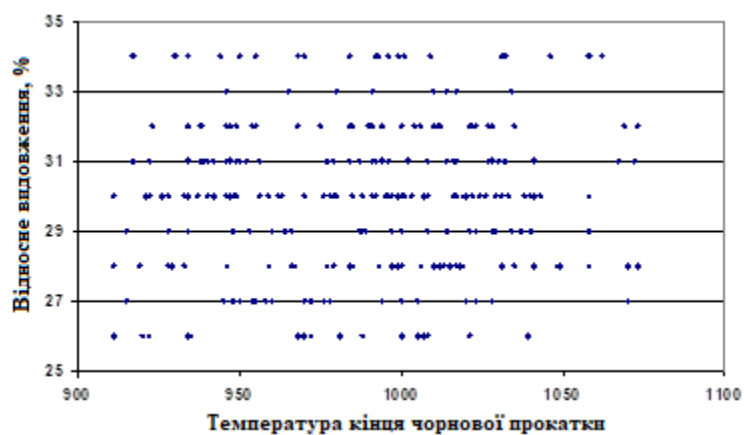
*a**б**в*

Рис. 2. Залежність механічних властивостей сталі 09Г2С від температури кінця чорнової прокатки: *a* — границі плинності, *б* — границі міцності, *в* — відносного видовження

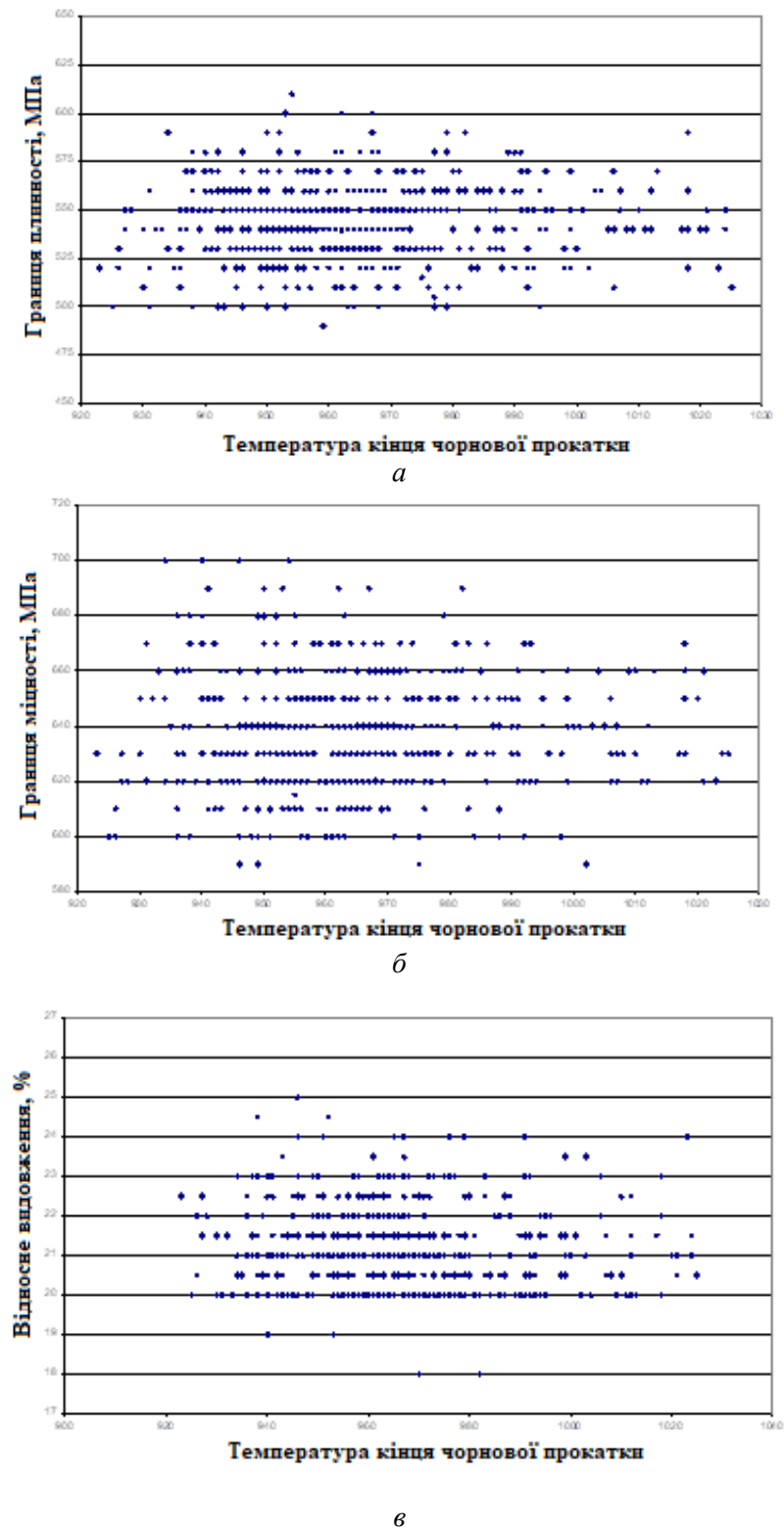


Рис. 3. Залежність механічних властивостей сталі 10Г2ФБ від температури кінця чорнової прокатки: *a* — границі плинності, *б* — границі міцності, *в* — відносного видовження

Аналіз гістограм показує, що всі досліджувані функції мають розподіл близькі до нормального, що дозволяє здійснювати побудову регресійної моделі без додаткових математичних перетворень аналізованих величин.

Як зовнішній вигляд функції відгуку (рівняння регресії) всім аналізованих випадків був обраний поліном ступеня n .

Попередній розрахунок показав, що всі коефіцієнти рівняння при ступенях вище 2-го є нескінченно малими величинами (порядок величини – $10^{-7...-11}$ і нижче). У зв'язку з цим при подальшій розробці регресійної моделі використовувався поліном 2-го ступеня.

Результати проведеного регресійного аналізу (уточнені коефіцієнти рівняння регресії) наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Отримані регресійні моделі для досліджуваних параметрів

Марка сталі	Вигляд рівняння регресії	Коеф. рівняння регресії		
		b0	b1	b2
<i>Предел текучести</i>				
Ст3пс	$\sigma_T = b_0 + b_1 * T_{\text{чер}} + b_2 * T_{\text{чер}}^2$	36,53590	0,412716	-0,000161
09Г2С	$\sigma_T = b_0 + b_1 * T_{\text{чер}} + b_2 * T_{\text{чер}}^2$	1521,577	-2,28035	0,001136
09Г2ФБ	$\sigma_T = b_0 + b_1 * T_{\text{чер}} + b_2 * T_{\text{чер}}^2$	-69,3118	1,213431	-0,000600
<i>Предел прочности</i>				
Ст3пс	$\sigma_T = b_0 + b_1 * T_{\text{чер}} + b_2 * T_{\text{чер}}^2$	-166,679	1,139237	-0,000526
09Г2С	$\sigma_T = b_0 + b_1 * T_{\text{чер}} + b_2 * T_{\text{чер}}^2$	705,7370	-0,37055	0,000178
09Г2ФБ	$\sigma_T = b_0 + b_1 * T_{\text{чер}} + b_2 * T_{\text{чер}}^2$	1142,592	-1,06138	0,000556
<i>Относительное удлинение</i>				
Ст3пс	$\delta_5 = b_0 + b_1 * T_{\text{чер}} + b_2 * T_{\text{чер}}^2$	-67,2367	0,188987	-0,000091
09Г2С	$\delta_5 = b_0 + b_1 * T_{\text{чер}} + b_2 * T_{\text{чер}}^2$	-7,36520	0,073863	-0,000036
09Г2ФБ	$\delta_5 = b_0 + b_1 * T_{\text{чер}} + b_2 * T_{\text{чер}}^2$	88,50430	-0,136170	0,000069

Після отримання регресійної моделі було проведено оцінку її адекватності. Як метод оцінки був використаний метод залишків (рис. 7—9). Величину наносили на папір імовірнісний і порівнювали з графіком прийнятої функції розподілу, яка на імовірнісній сітці зображується прямою лінією.

Як видно з наведених даних, залишки лягають поблизу прямої з випадковими відхиленнями вліво та вправо. Отже, результати розрахунку значень для всіх описуваних функцій відгуку за отриманою регресійною моделлю відповідають нормальному закону розподілу. Таким чином, можна зробити висновок, що отримані регресійні моделі з ймовірністю 95 % описують залежність функції відгуку від температури кінця гарячої деформації.

Обговорення результатів проведених досліджень. З отриманих математичних моделей (рівнянь регресії) було побудовано модельні графіки залежностей досліджуваних функцій відгуку від температури кінця гарячої деформації. Дані залежності наведено на рис. 10.

Аналіз наведених малюнку даних показує, максимальні значення межі плинності, межі міцності та відносного подовження для сталі Ст3сп досягаються в інтервалі температур кінця гарячої деформації 1100...1000°C. При подальшому зниженні температури спостерігається зниження даних показників.

Для сталей 09Г2С в інтервалі температур 950...850°C спостерігається підвищення характеристик міцності при незначному зниженні (на 1...1,5 одиниці) значень відносного подовження.

Для сталі 09Г2ФБ зі зниженням температури кінця гарячої деформації (950...850°C) характеристики міцності практично не змінюються (незначне збільшення межі міцності), проте, при цьому спостерігаються підвищення значень відносного подовження.

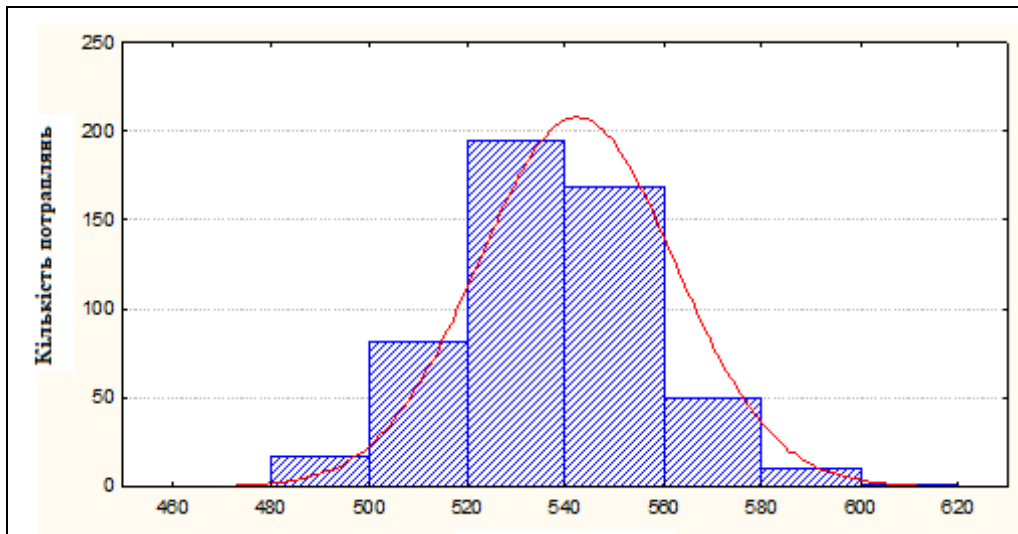
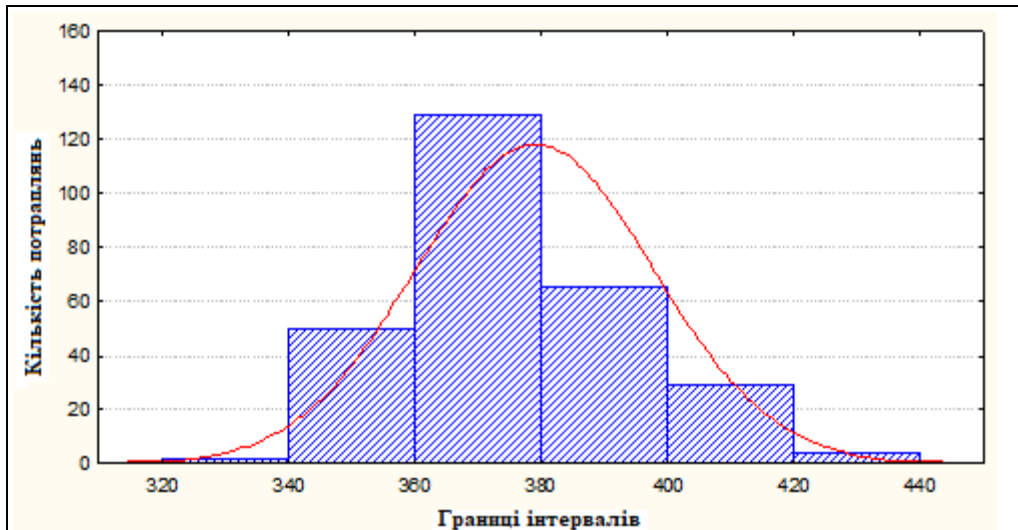
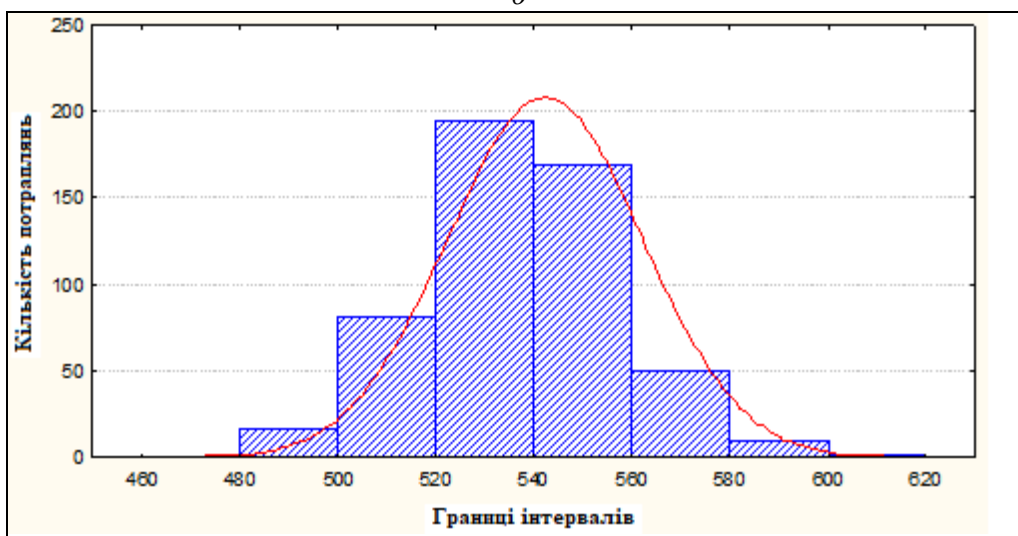
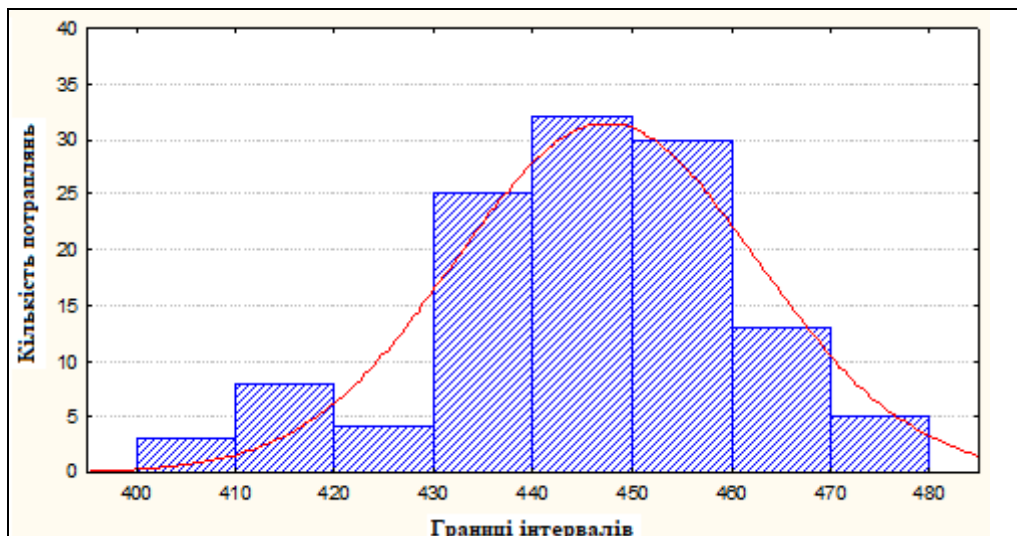
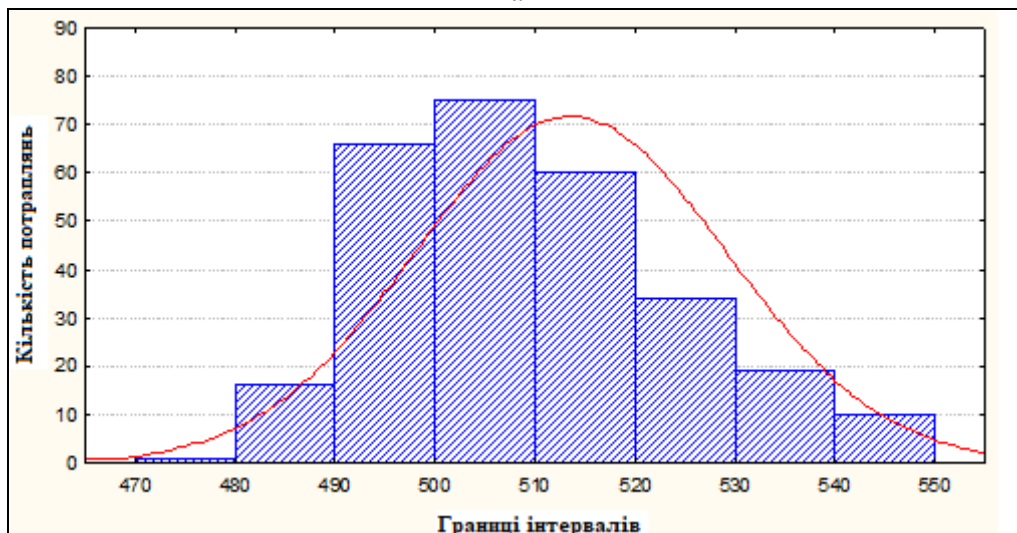
*a**б**в*

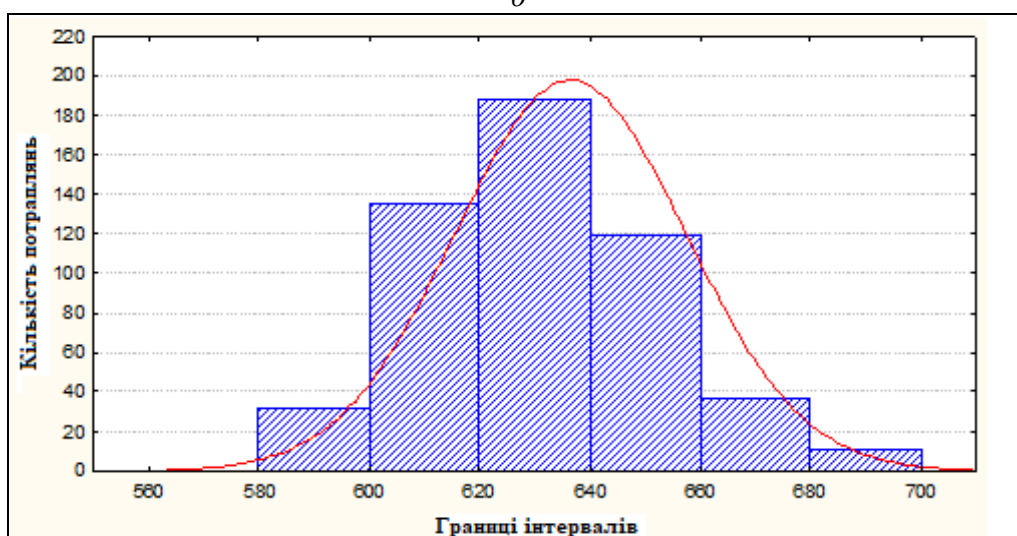
Рис. 4. Гістограми розподілу границі плинності досліджуваних марок стали: *a* - Ст3пс, *б* — 09Г2С, *в* — 09Г2ФБ



а

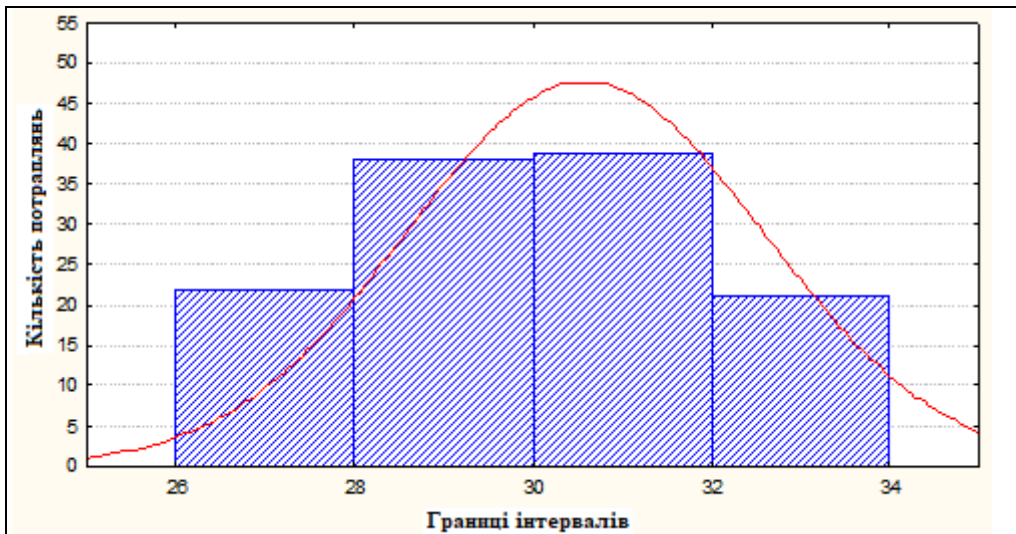


б

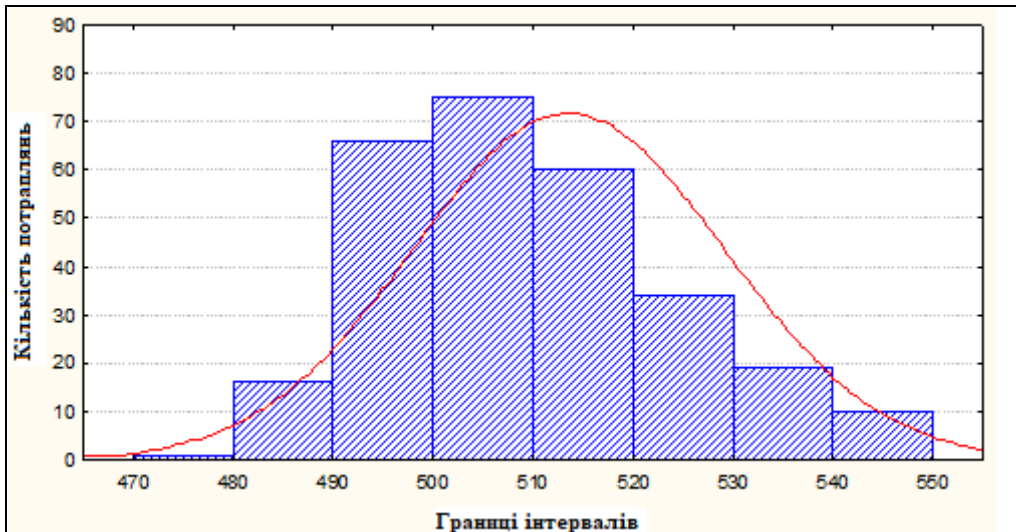


в

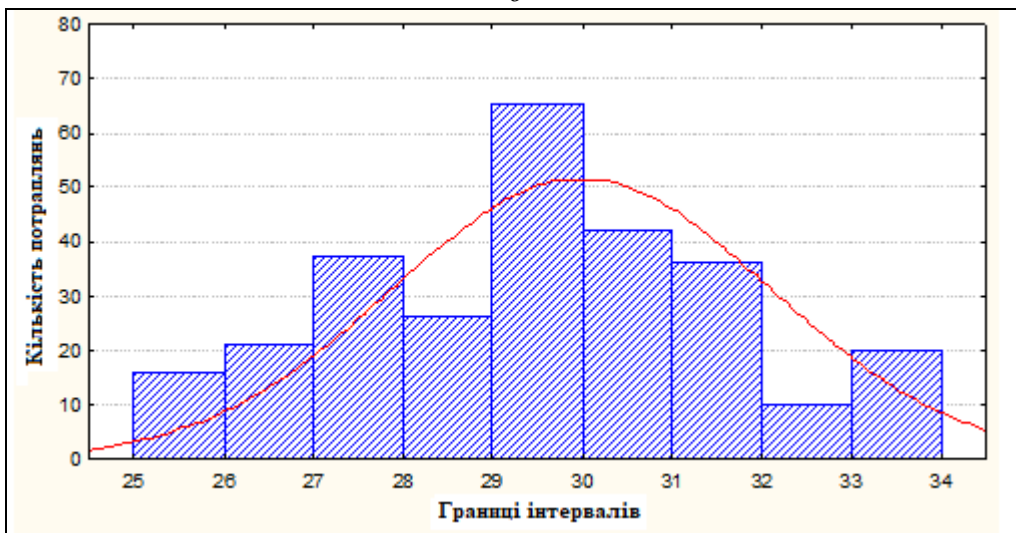
Рис. 5. Гістограми розподілу границі міцності досліджуваних марок стали: а — Ст3пс, б — 09Г2С, в — 09Г2ФБ



а



б



в

Рис. 6. Гістограми розподілу відносного видовження досліджуваних марок сталі: а — СтЗпс, б — 09Г2С, в — 09Г2ФБ

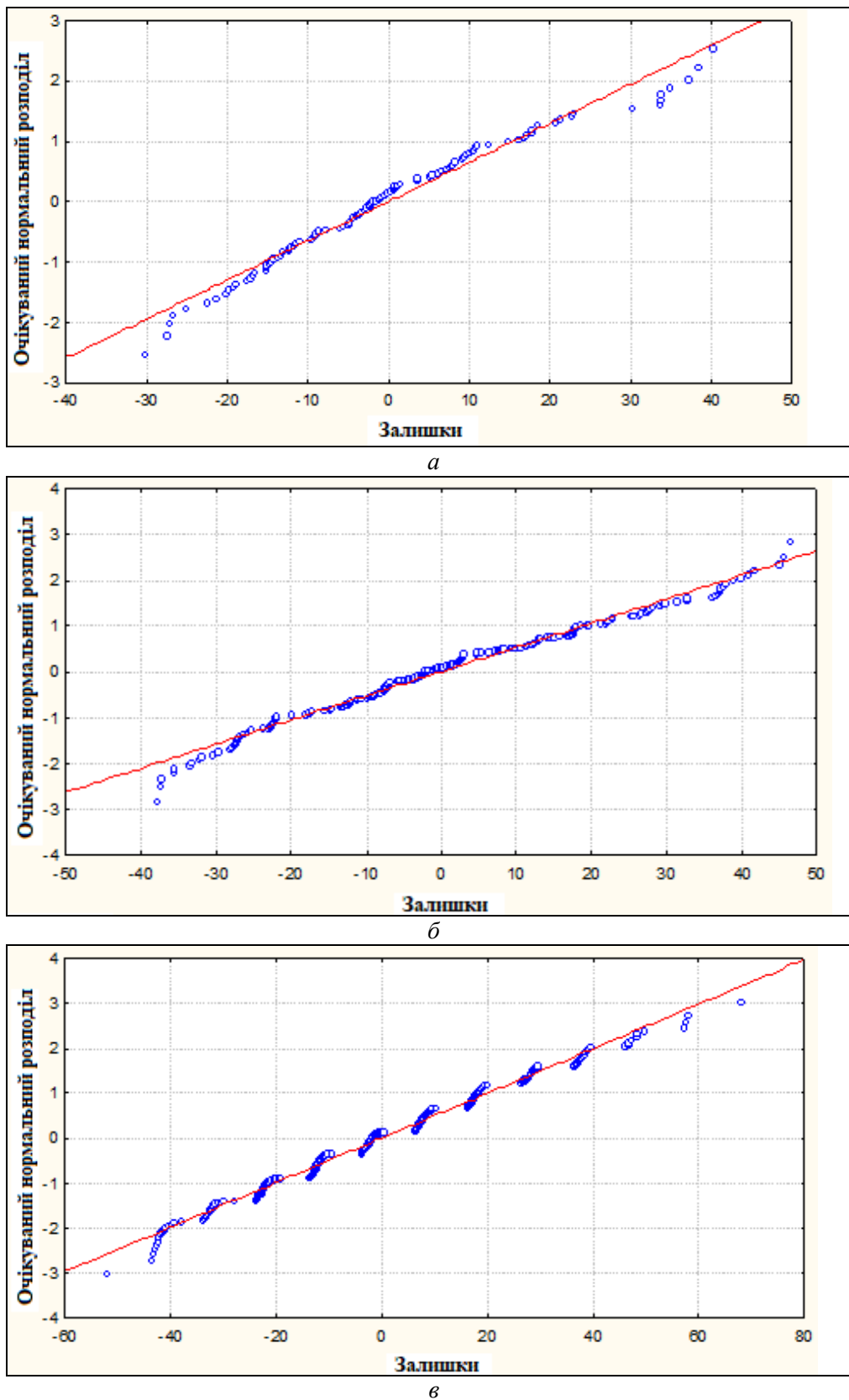


Рис. 7. Оцінка адекватності отриманих регресійної моделі залежності границі плинності від температури кінця гарячої деформації для досліджуваних марок сталі: а — Ст3пс, б — 09Г2С, в — 09Г2ФБ

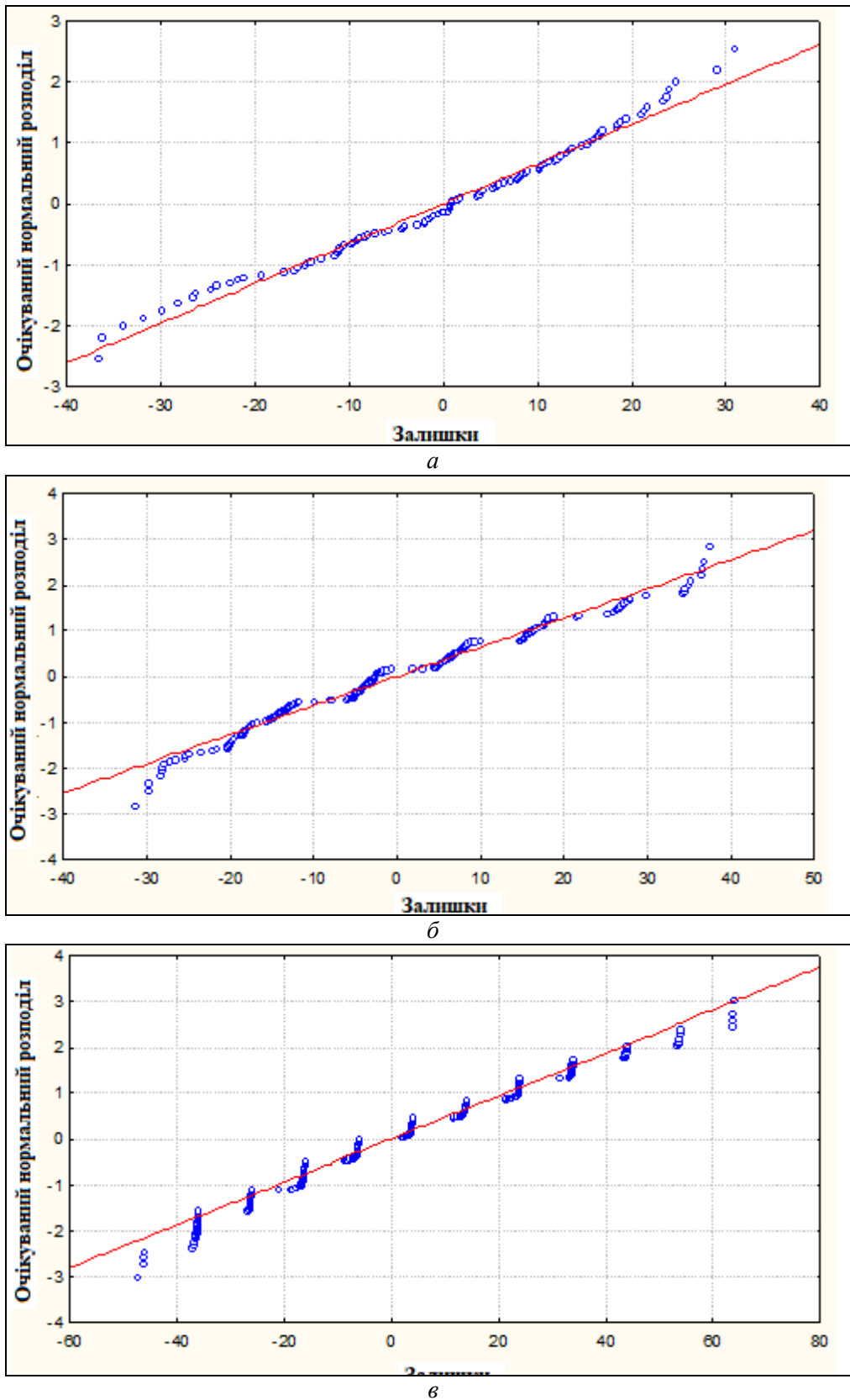


Рис. 8. Оцінка адекватності отриманих регресійної моделі залежності границиміцності від температури кінця гарячої деформації для досліджуваних марок сталі: а — Ст3пс, б — 09Г2С, в — 09Г2ФБ

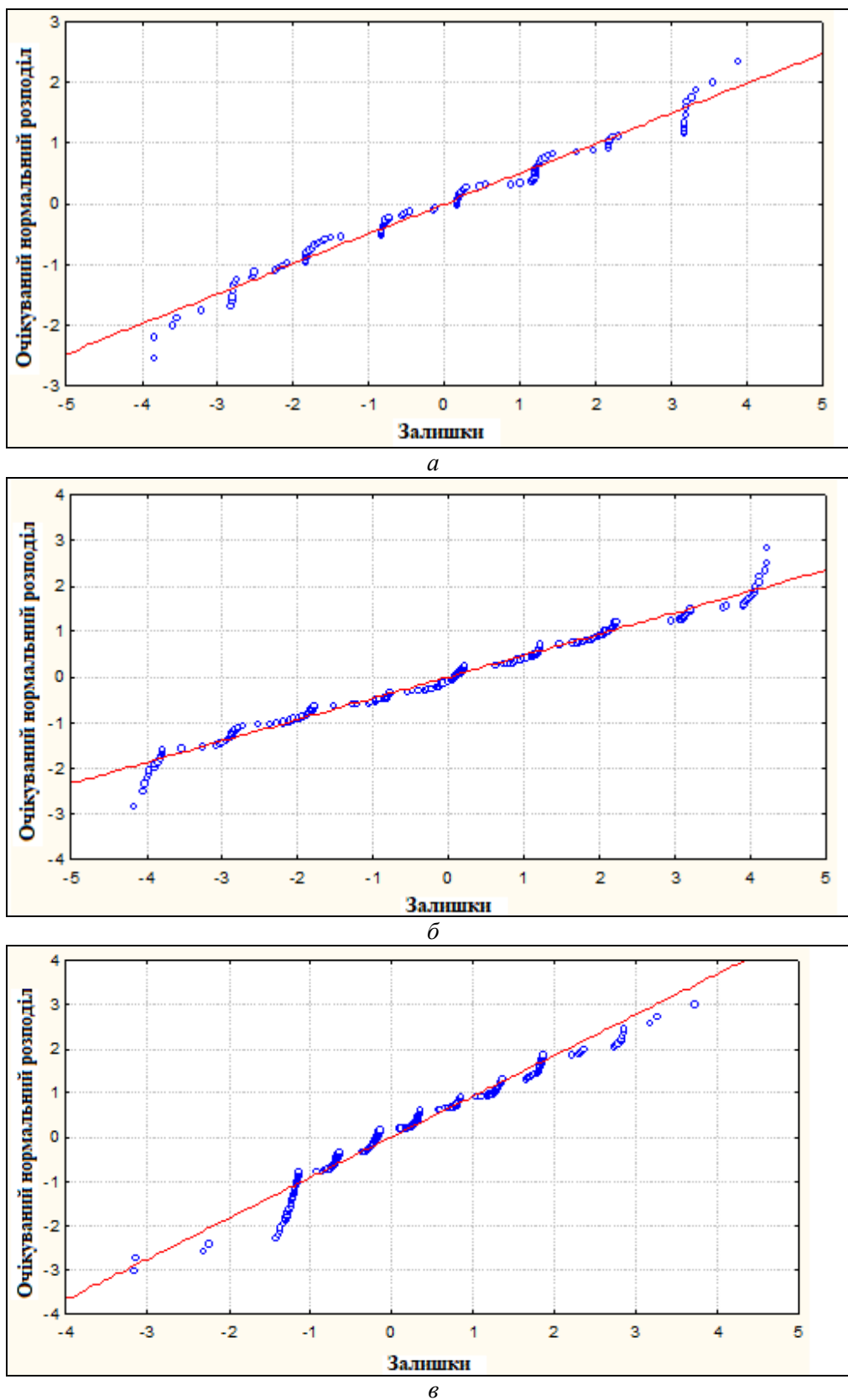
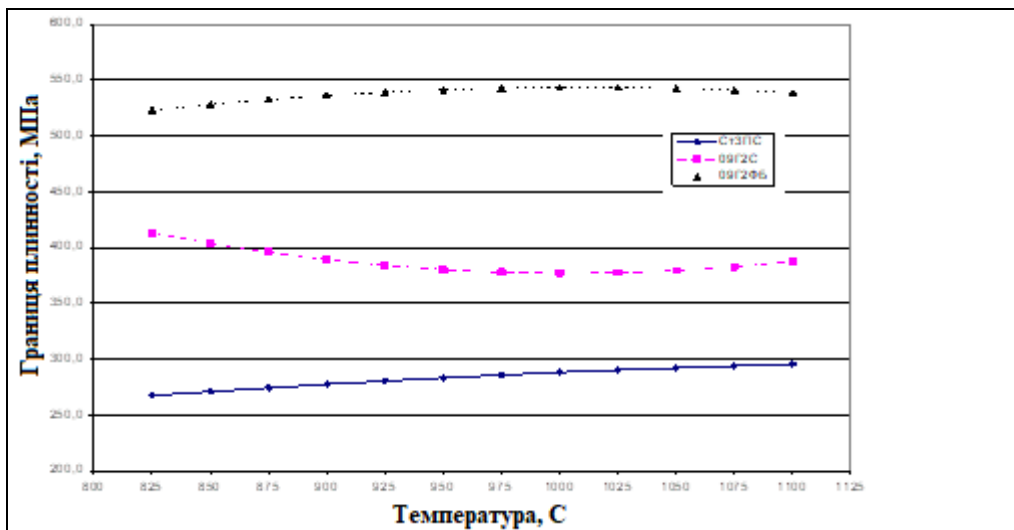
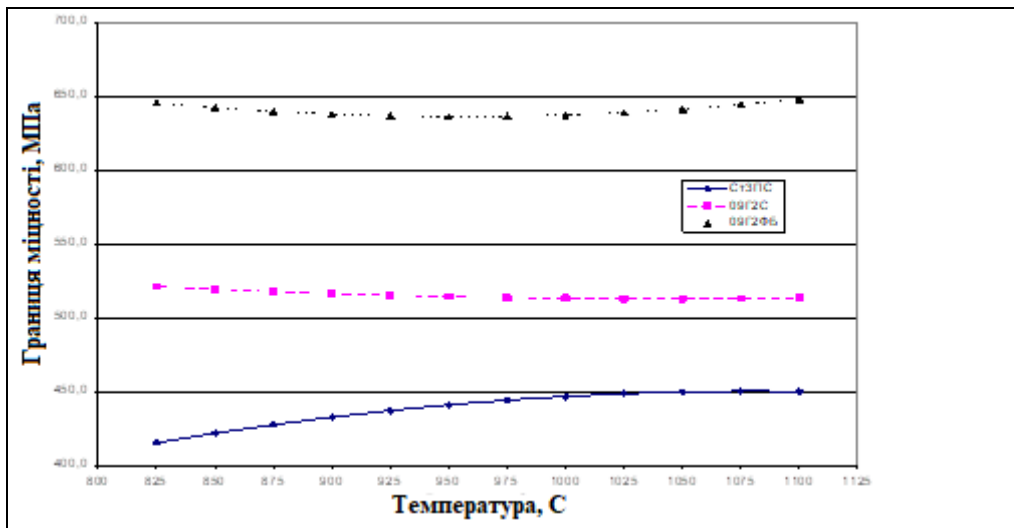


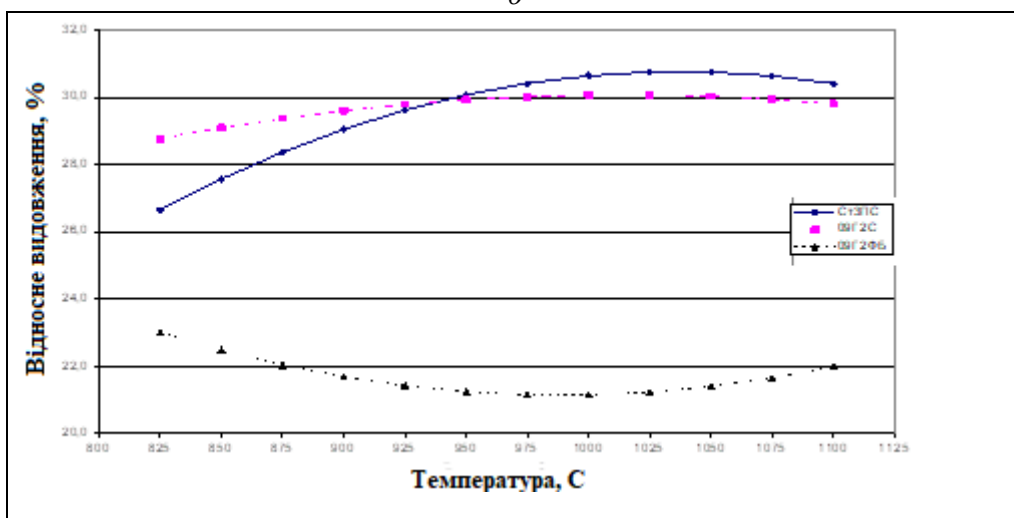
Рис. 9. Оцінка адекватності отриманих регресійної моделі залежності відносного видовження від температури кінця гарячої деформації для досліджуваних марок стали: *a* — Ст3пс, *б* — 09Г2С, *в* — 09Г2ФБ



а



б



в

Рис. 10. Розрахункові залежності досліджуваних функцій відгуку температури кінця гарячої деформації: а — границя плинності; б — границя міцності; в — відносне видовження

Слід зазначити, що у роботі розглядалося зміна механічних властивостей металопрокату залежно лише від одного чинника — температури кінця гарячої деформації. Для отримання повнішої картини зміни властивостей необхідно враховувати вплив інших факторів: хімічного складу, товщини листа, швидкості охолодження між клітями, темпу прокатки, розподілів обтискань між станами та ін. Для отримання повної математичної моделі технології прокатки металу необхідно застосування більш складних операцій математичної теорії обробки результатів експериментальних даних: дисперсійного та нелінійного багатофакторного регресійного аналізу.

Висновки

1. На підставі даних кореляційного аналізу встановлено зовнішній вигляд залежності границі плинності, границі міцності, відносним видовженням та температурою кінця гарячої деформації.

2. Показано, що всі розподіли функцій відгуку відповідають нормальному і, отже, можливе застосування нелінійного однофакторного регресійного аналізу з метою отримання математичних залежностей функцій відгуку незалежної змінної (температури кінця гарячої деформації).

3. Проведено оцінку отриманих регресійних моделей за методом залишків. Цей аналіз показав, що моделі з ймовірністю 95% описують взаємозв'язок між змінними.

4. На підставі отриманих математичних моделей побудовано графічні залежності границі плинності, границі міцності, відносного видовження від температури кінця гарячої деформації.

5. Для сталі Ст3пс необхідно проводити гарячу прокатку за температури кінця деформації приблизно 1000°C.

6. Аналіз отриманих залежностей показав, що для сталей 09Г2С та 09Г2ФБ гарячу прокатку рекомендується проводити у температурному інтервалі 950...900°C.

Список використаної літератури

1. Сагіров Ю. Г. Комп'ютерне моделювання багатотільних моделей [Електронний ресурс]: конспект лекцій. Маріуполь: ПДТУ. 2019. 104 с.
2. Клименко М. І., Гребенюк С. М. Математичне моделювання складних систем: конспект лекцій. Запоріжжя: ЗНУ. 2021. 73 с.
3. Кушлик-Дивульська О. І., Поліщук Н. В., Орел Б. П., Штабалиук П. І. Теорія ймовірностей та математична статистика: навч. посіб. К: НТУУ «КПІ». 2014. 212 с.
4. Огірко О. І., Галайко Н. В. Теорія ймовірностей та математична статистика: навчальний посібник. Львів: ЛьвДУВС. 2017. 292 с.
5. Іванюта І. Д., Рибалка В. І., Рудоміно-Дусятська І. А. Елементи теорії ймовірностей та математичної статистики. К.: Слово. 2003. 272 с.
6. Ловейкін В.С. Теорія технічних систем. К.: ЦП «КОМПРИНТ». 2017. 291 с.
7. Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтяк В. В. Математичне моделювання систем і процесів: навч. посіб. К.: НАУ. 2017. 392 с.

References

- [1] Sagirov Yu. G. (2019) Kompiuterne modeliuвання bahatotilnykh modelei [Computer modeling of rich models]. [Electronic resource]: lecture notes. Mariupol: PDTU. 104 p [in Ukrainian].
- [2] Klymenko M. I., Hrebeniuk S. M. (2021) Matematychnе modeliuвання skladnykh system [Mathematical modeling of complex systems]: lecture notes. Zaporizhzhia: ZNU. 73 p [in Ukrainian].
- [3] Kushlyk-Dyvulska O. I., Polishchuk N. V., Orel B. P., Shtabaliuk P. I. (2014) Teoriia ymovirno- stei ta matematychna statystyka [The theory of probabilities and mathematical statistics]: навч. посіб. К: НТУУ «КПІ». 212 p. [in Ukrainian].

- [4] Ohirko O. I., Halaiko N. V. (2017) Teoriia ymovirnosti ta matematychna statystyka [Probability theory and mathematical statistics] : educational manual. Lviv: LvDUVS. 292 p. [in Ukrainian].
- [5] Ivaniuta I. D., Rybalka V. I., Rudomino-Dusiatska I. A. (2003) Elementy teorii ymovirnosti ta matematychnoi statystyky [Elements of probability theory and mathematical statistics]. K.: Slovo.. 272 p. [in Ukrainian].
- [6] Loveikin V.S. (2017) Teoriia tekhnichnykh system [Theory of technical systems] K.: CP "COMPRINT". 291 p. [in Ukrainian].
- [7] Pavlenko P. M., Filonenko S. F., Cherednikov O. M., Treitiak V. V. (2017) Matematychno modeliuвання system i protsesiv [Mathematical modeling of systems and processes]: education manual K.: NAU. 392 p. [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії 14.11.2023