

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**КОЗЕЧКО ВАЛЕНТИН ІВАНОВИЧ**

**УДК 669-1:539.374.1:539.375.5**

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ФОРМУВАННЯ КОМПЛЕКСУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**  
**НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ МІКРОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ**  
**В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ТОВЩИНИ МЕТАЛОПРОКАТУ**

Спеціальність 132 – Матеріалознавство  
Галузь знань – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

---

**В. І. КОЗЕЧКО**

Науковий керівник Лаухін Д.В., доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2024

## АНОТАЦІЯ

*Козечко В.І.* Формування комплексу механічних властивостей низьковуглецевих мікролегованих сталей в залежності від товщини металопрокату. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 132 – Матеріалознавство. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2024.

Товсті листи мають широкий спектр застосування. Вони можуть утворювати як перерізи несучих елементів конструкцій так і щільно-міцні оболонки, що застосовуються для зберігання, перевантаження, транспортування та переробки рідких, газоподібних і сипучих речовин. Стосовно будівництва, товстолистовий металопрокат, в основному, застосовується при виробництві зварних конструкцій каркасів будівель і споруд. При цьому слід зазначити, що діюча на теперішній час нормативна документація передбачає при проектуванні зварних металевих конструкціях застосування металопрокату однакової товщини по перерізу елементів конструкцій. Однак, аналіз розподілу зовнішнього навантаження по перерізу конструкцій показує, що у деяких випадках слід застосувати при виробництві конструкцій листи різної товщини.

У якості матеріалу для дослідження було обрано низько вуглецеву мікролеговану сталь 10Г2ФБ в товщинах: 16, 20, 30, 40, 50, 70, 100 мм.

Згідно поставленої мети, в роботі досліджувалися властивості, які б характеризували кінетику руйнування в об'ємі матеріалу, тобто спроможність матеріалу чинити опір зародженню та розповсюдженню тріщин. У якості експериментальних методик було застосовано: статичні механічні випробування (випробування на розтяг) і динамічні механічні випробування (випробування на ударний вигін).

Дослідження морфології структурних складових та поверхонь зламів здійснювали послідовно: 1-й етап: дослідження зразків при малих збільшеннях (металографічний аналіз); 2-й етап: дослідження зразків при середніх та порівняно високих збільшеннях (растрова електрона мікроскопія); 3-й етап:

дослідження поверхонь руйнування (растрова електрона мікроскопія).

Мікроструктурний аналіз показав, що мікроструктурними складовими усіх досліджуваних систем є ферит та перліт. Сталь товщиною 16 мм має ферито-перлітну структуру у співвідношенні 70% - 30% відповідно. Зі збільшенням товщини збільшується відсотковий вміст феритної складової з одночасним зменшенням відсотку перліту. Для сталі товщиною 100 мм мікроструктура складається з 80 % фериту та 20 % перліту. Ферит формується у виді зерен поліедричної форми, а перлітні колонії розташовано у ліквіційних полосах.

Дослідження тонкої структури показали, що для всіх товщин металопрокату зерна феритної фази мають правильну поліедричну форму. Зародки нових фаз з'являються найчастіше на поверхні зерен аустеніту й включень. Надалі відбувається поступовий ріст цементиту й фериту у вигляді приблизно рівноосних утворень. У деякий момент на границях зерен виникають зародки цементиту, які ростуть у вигляді пластин у середину зерна. Таким чином, позмінна перекристалізація цементиту й фериту поширюється уздовж границь. З'являються колонії перліту, ріст яких триває до їхнього взаємного зіткнення.

В дисертаційній роботі показано, що зі збільшенням товщини металопрокату спостерігається зміна форми цементитного каркасу перлітних колоній з сферо подібного на в'ялоподібний. Цей факт пояснюється відповідними змінами умов охолодження з підвищенням товщини.

На підставі отриманих кількісних даних щодо залежності відсоткового вмісту структурних складових від товщини металопрокату було побудовано відповідні регресійні моделі. Аналіз моделей показує, що аналізовані залежності мають нелінійний характер і описуються логарифмічними рівняннями типу  $Y=b_0+b_1 \times \log_{10}(x)$ .

Аналіз даних фрактографічного аналізу поверхонь руйнування показав, що для товщини 16 мм руйнування відбувається внаслідок косоного зламу, поверхня має гладкі поверхні та ступені – ознаки руйнування за механізмом квазісколу. Згідно даних металографічного аналізу у структурі металопрокату даної товщини присутні ферит і перліт. Виходячи з цього, можливо припустити, що

ознаки крихкого руйнування будуть мати перлітні колонії. Квazівідрив на початковій стадії утворення фасетки виявляє ознаки переважно кристалічного відриву, тоді як у місцях злиття мікротріщин виявляються ознаки пластичного руйнування.

Мікрофрактографічні знімки товщин 20...50 мм кардинально відрізняються від знімків товщини 16 мм тим, що з'являються області локалізації пластичної деформації, які призводять до зросту в'язкої складової зламу. Разом з цим, на зламах також присутні елементи квазікрихкого внутризеренного руйнування. Підтвердження того, що дана структурна складова зруйнувалася шляхом квазіскола, є наявність трьох основних його ознак: язички, сходи, гребені.

В роботі показано, що на зламах товщин 70...100 мм присутні сліди значної пластичної деформації та велика кількість пор біля часток. Ці частки слугують осередками зародження руйнування, та стримують розповсюдження тріщин, роблячи руйнування в'язким. При цьому, переважним процесом є пластична деформація. Так, у процесі пластичної деформації неоднакова пружність і пластичність матриці часток другий фази приводить до утвору на границях розділів між ними мікротріщин або вільних поверхонь. Поверхні зламу, що утворилися при злитті порожнин, являють собою округлі западини.

В дисертаційній роботі також поведено експериментальне дослідження часток другої фази на яких відбулося зародження пор з використанням енергодисперсійного аналізу. Результати даного комплексу досліджень показують, що зародження пор для всіх товщин металопрокату, в основному, відбувається на хімічних сполуках типу Сульфїду марганцю. Разом с цим, слід зазначити що певна кількість пор утворювалася на карбідах. Зародження в'язкого руйнування, ймовірно, можливо описати дією трьох механізмів: початкова стадія – формування дислокаційних петель навколо частки (модель Броека); наступні стадії зросту пори відбуваються за рахунок накопичення дислокацій. При цьому, ця стадія відбувається під дією обох компонентів напруги нормальної і зсувної. Саме за таких умов можливо зростання пор у двох напрямках (у площині) вздовж



та поперек прикладеного навантаження. Оскільки отримані дані свідчать про можливість зародження руйнування на карбідах та сульфідах, було зроблено припущення, що важливий вплив на процеси зародження руйнування також має розмір часток другої фази. Відповідні розрахунки показали, що основний вплив на зародження руйнування мають три типи часток другої фази: великі частки (розмір 1...20 мкм); проміжні частки (розмір 500...5000 Å); осаджені частинки (розмір 50-500 Å).

Для визначення впливу розподілу хімічного складу на ударну в'язкість з урахуванням товщини металопрокату було проведено комплекс досліджень, який містив елементи кореляційного та дисперсійного аналізу. Даний тип аналізу було застосовано з метою визначення наявності впливу кожного з елементів хімічного складу сталі на ударну в'язкість. Результати проведених досліджень дозволили відокремити хімічні елементи який мають тісний взаємозв'язок з ударною в'язкістю, тобто залежність практично функціональна (коефіцієнт кореляції порядку одиниці).

З метою визначення впливу кожного з елементів та їх з'єднань на показники ударної в'язкості було проведено однофакторний та багатфакторний дисперсійний аналіз, результати яких наведено на даному слайді. Отримані дані дозволили встановити, що найбільш впливовими на ударну в'язкість є хімічні сполуки мікролегуючих елементів з сіркою – сульфіди.

Для детального аналізу впливу структурного стану на комплекс характеристик міцності та пластичних властивостей металопрокату було побудовано відповідні математичні моделі, загальні вигляд яких приведено на даному слайді. Отриманні залежності мають поліноміальний характер. Сумісний аналіз отриманих моделей та фізичних основ досліджуваних процесів показав, що на міцносні характеристики найбільший вплив оказує відсоток перлітної складової, на пластичні – феритної.

З метою кількісної оцінки впливу відсоткового вмісту структурних складових на показники ударної в'язкості було побудовано відповідні математичні моделі. Аналіз даних мікрофрактографічних досліджень показав,

що мікропори при в'язкому характері руйнування для всіх товщин, що досліджуються зароджуються на поверхнях розділу між матрицею і частинками. При цьому, для зразків порівняно невеликої товщини спостерігаються ознаки крихкого руйнування, хоча показники механічних властивостей високі і матеріал повністю пластичний. На мікрофрактографічних знімках для товщини понад 30 мм сумарна в'язкість руйнування складається з внесків компонент як косої, так і прямої частки поверхні руйнування. З наведених в дисертації графіків випливає, що, для всіх моделей, залишки хаотично розкидані на площині і в їх поведінці немає закономірностей. Таким чином, отримані регресійні моделі досить адекватно описує досліджувані залежності.

Відповідно до поставленої мети, в даній роботі було виконано модельний розрахунок використання елементів будівельної конструкції, виготовлених з металопрокату різної товщини та визначено область ефективного застосування даного підходу. Для цього, проаналізовано формоутворення сучасних сталевих каркасів з точки зору сприйняття елементами конструкцій зовнішніх навантажень. При цьому слід зазначити, що на теперішній час при прольотах до 36 м перевага віддається фермам з паралельними поясами, у яких довжини всіх розкосів і стійок однакові, що забезпечує мінімум трудовитрат при виготовленні.

Моделювання проводилось за трьома варіантами компоновки:

Варіант 1. Ферму виготовлено з будівельної сталі 09Г2С. При цьому застосовувалися елементи однакової товщини (60 мм); для розрахунку використовувалися дані літературних джерел.

Варіант 2. Ферму виготовлено з сталі 10Г2ФБ. При цьому застосовувалися елементи однакової товщини (60 мм);

Варіант 3. Ферму виготовлено з сталі 10Г2ФБ. При цьому використовувалися елементи різної товщини: верхній пояс (VP) – товщина 100мм; нижній пояс (NP) – товщина 70мм; раскоси (D1) – товщина 70мм; раскоси (D2) – товщина 50мм; ребра жорсткості (V) – товщина 20 мм. Товщину металопрокату для конструктивних елементів ферми підбирали відповідно до результатів, отриманих в розділі 4. В якості даних для модельного розрахунку

використовували результати дослідження механічних властивостей.

Аналіз отриманих результатів модельного розрахунку металоконструкцій показав, що застосування металопрокату різної товщини для виробництва стропильної ферми призводить до зниження металоємності конструкції без втрати її несучої здатності. Ефективність запропонованого підходу оцінювали за допомогою співвідношення між економією у вазі в порівнянні з класичним варіантом компоновки стропильної ферми.

В дисертаційній роботі також виконано модельну оцінку вартості використання запропонованого підходу для виробництві будівельних конструкцій. Аналіз отриманих даних показав, що використання стропильної ферми з різними товщинами конструктивних елементів призводить до зниження вартості готового виробу більш ніж на 20% в порівнянні з класичним варіантом компоновки стропильної ферми.

**Ключові слова:** низьковуглецева низьколегована сталь, товщина металопрокату, зовнішнє навантаження, пластична деформація, механізм руйнування, структурний стан, механічні властивості, мікроструктура, фрактографія, математичне моделювання.

## ABSTRACT

*Valentyn Kozechko* Formation of a complex of mechanical properties of low-carbon microalloyed steels depending on the thickness of the rolled metal. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Theses for obtaining a scientific degree of the Doctor of Philosophy in the field of knowledge 13 - Mechanical engineering on a specialty 132 - Materials science. - Dnipro University of Technology, Dnipro, 2024.

Thick plates have a wide range of applications. They can form both cross-sections of load-bearing structural elements and dense, strong shells used for the storage, handling, transportation, and processing of liquids, gases, and bulk materials. In construction, thick plate rolled metal is primarily used in the production of welded structural frames for buildings and structures. It is worth noting that the current regulatory documentation requires the use of rolled metal of uniform thickness across the cross-section of structural elements in the design of welded metal structures. However, an analysis of the distribution of external loads across the cross-section of structures shows that in some cases, plates of varying thickness should be used in the production of structures.

Low-carbon microalloyed steel 10G2FB was selected as the material for the study, with thicknesses of 16, 20, 30, 40, 50, 70, and 100 mm.

In accordance with the set objective, the study investigated properties that characterize the kinetics of material failure, specifically the material's ability to resist crack initiation and propagation. The experimental methods included static mechanical testing (tensile testing) and dynamic mechanical testing (impact bending testing).

The study of the morphology of structural components and fracture surfaces was conducted in stages:

1. First Stage: Examination of samples at low magnification (metallographic analysis).
2. Second Stage: Examination of samples at medium and relatively high magnification (scanning electron microscopy).
3. Third Stage: Examination of fracture surfaces (scanning electron microscopy).

Microstructural analysis revealed that the microstructural components of all studied systems are ferrite and pearlite. The 16 mm thick steel exhibits a ferrite-pearlite structure in a 70%-30% ratio, respectively. As the thickness increases, the percentage of ferrite increases while the percentage of pearlite decreases. For the 100 mm thick steel, the microstructure consists of 80% ferrite and 20% pearlite. Ferrite forms as grains with a polyhedral shape, while pearlite colonies are located in segregation bands.

Analysis of the fine structure showed that for all thicknesses of rolled metal, the grains of the ferritic phase have a regular polyhedral shape. Nucleation of new phases most frequently occurs on the surface of austenite grains and inclusions. Subsequently, cementite and ferrite grow gradually as roughly equiaxed formations. At a certain point, cementite nuclei form along grain boundaries and grow as plates into the grain interior. This process results in alternating recrystallization of cementite and ferrite, which propagates along the boundaries. Pearlite colonies appear and continue to grow until they come into contact with each other.

The dissertation demonstrates that as the thickness of the rolled metal increases, there is a change in the shape of the cementite framework within pearlite colonies from spherical to fan-like. This phenomenon is explained by corresponding changes in cooling conditions with increasing thickness.

Based on the quantitative data obtained on the dependence of the percentage of structural components on the thickness of the rolled metal, regression models were developed. Analysis of these models shows that the observed dependencies are nonlinear and can be described by logarithmic equations of the form  $Y = b_0 + b_1 \log_{10}(x)$ .

Fractographic analysis of fracture surfaces revealed that for the 16 mm thickness, fracture occurs due to shear failure, characterized by smooth surfaces and steps—signs indicative of a quasi-cleavage mechanism. According to metallographic analysis, the structure of the rolled metal of this thickness contains ferrite and pearlite. Therefore, it can be assumed that the brittle fracture characteristics are associated with pearlite colonies. At the initial stage of facet formation, quasi-cleavage shows signs of

predominantly crystalline separation, while in areas of microcrack coalescence, signs of ductile fracture are observed.

Microfractographs of samples with thicknesses of 20 to 50 mm differ significantly from those of the 16 mm samples due to the appearance of localized plastic deformation zones, leading to an increase in the ductile component of the fracture. Additionally, elements of quasi-brittle intragranular fracture are also present on these fractures. The confirmation that this structural component fractured by quasi-cleavage is provided by the presence of three main characteristics: tongues, steps, and ridges.

The work demonstrates that in fractures of 70–100 mm thickness, significant plastic deformation traces and a large number of pores near inclusions are present. These inclusions act as nucleation sites for fracture initiation and impede crack propagation, making the fracture ductile. Plastic deformation is the predominant process in this case. During plastic deformation, the differential elasticity and plasticity between the matrix and second-phase particles lead to microcracks or free surfaces forming along their boundaries. The fracture surfaces resulting from pore coalescence appear as rounded depressions.

The dissertation also includes an experimental investigation of second-phase particles where pore nucleation occurred, using energy-dispersive analysis. The results show that pore nucleation across all rolled metal thicknesses mainly occurs on chemical compounds like manganese sulfide. Additionally, some pores were observed to form on carbides. Ductile fracture initiation can likely be described by three mechanisms: an initial stage of dislocation loop formation around the particle (Broek model), followed by pore growth due to dislocation accumulation. This growth stage occurs under both normal and shear stress components, enabling pore expansion in two directions (within the plane) along and across the applied load. Since the data indicate the possibility of fracture initiation on carbides and sulfides, it was hypothesized that the size of second-phase particles also significantly affects fracture initiation. Calculations confirmed that three types of second-phase particles primarily influence fracture initiation: large

particles (1–20  $\mu\text{m}$ ), intermediate particles (500–5000  $\text{\AA}$ ), and precipitated particles (50–500  $\text{\AA}$ ).

To determine the impact of chemical composition distribution on impact toughness with respect to rolled metal thickness, a series of studies incorporating correlation and dispersion analysis was conducted. This analysis was applied to identify the influence of each element in the steel's chemical composition on impact toughness. The results allowed for the identification of chemical elements that have a strong correlation with impact toughness, with the dependence being nearly functional (correlation coefficient close to one).

To assess the effect of each element and their compounds on impact toughness, both one-way and multifactor dispersion analyses were performed, with the results presented on this slide. The data indicate that the most significant impact on impact toughness is exerted by chemical compounds of microalloying elements with sulfur—specifically, sulfides.

For a detailed analysis of the structural state's influence on the comprehensive characteristics of strength and ductility in rolled metal, corresponding mathematical models were developed, with their general form presented on this slide. The obtained dependencies are polynomial in nature. A combined analysis of the models and the physical foundations of the processes under study showed that strength characteristics are most influenced by the percentage of pearlite, while ductility characteristics are most influenced by ferrite.

To quantify the effect of the structural component percentages on impact toughness, corresponding mathematical models were created. Microfractographic data analysis revealed that micropores in ductile fracture for all studied thicknesses are nucleated at the interface between the matrix and particles. For relatively thin samples, brittle fracture signs are observed, even though mechanical properties are high and the material is fully ductile. In microfractographic images of samples over 30 mm in thickness, the total toughness of the fracture includes contributions from both inclined and flat fracture surface components. The graphs presented in the dissertation indicate that, for all models, residuals are randomly scattered on the plane without discernible

patterns, indicating that the regression models adequately describe the observed dependencies.

In line with the objectives, this study performed a model calculation for the use of structural elements made from rolled metal of varying thicknesses and determined the effective application range of this approach. This involved analyzing the shape formation of modern steel frameworks with respect to the load-bearing capacity of structural elements. Notably, for spans up to 36 meters, trusses with parallel chords—where all braces and uprights are of equal length—are preferred, as this design minimizes labor costs in fabrication.

The modeling was conducted with three configuration options:

Option 1: The truss was made from structural steel grade 09G2S with uniform thickness elements (60 mm), utilizing data from literature sources for calculations.

Option 2: The truss was made from steel grade 10G2FB with uniform thickness elements (60 mm).

Option 3: The truss was made from steel grade 10G2FB, but using elements of varying thicknesses: the upper chord (VP) with a thickness of 100 mm, the lower chord (NP) with a thickness of 70 mm, diagonal bracing (D1) with a thickness of 70 mm, diagonal bracing (D2) with a thickness of 50 mm, and stiffeners (V) with a thickness of 20 mm. The thickness of rolled metal for the truss elements was selected based on the results obtained in Section 4. The data for the model calculation used the findings from the mechanical properties analysis.

Analysis of the results from the model calculation of metal structures showed that using rolled metal of varying thicknesses for truss fabrication reduces the structure's metal consumption without compromising its load-bearing capacity. The effectiveness of the proposed approach was assessed by comparing weight savings relative to the classic truss configuration.

The dissertation also includes a cost model assessment for the proposed approach in building structure production. The analysis showed that using a truss with varying element thicknesses reduced the final product's cost by more than 20% compared to the classic truss configuration.



**Key words:** low-carbon low-alloy steel, thickness of rolled metal, external load, plastic deformation, mechanism of destruction, fracture mechanism, structural condition, mechanical properties, microstructure, fractography, mathematical modeling.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

### Статті у наукових фахових виданнях:

1. Лаухін, Д. В., Бекетов, О. В., Дадіверіна, Л. М., & Козечко, В. І. (2023). Дослідження взаємозв'язку між температурою кінця гарячої деформації та комплексом механічних властивостей низьковуглецевих сталей на основі аналізу регресійних моделей // Математичне моделювання, (2 (49)), 182-197. [https://doi.org/10.31319/2519-8106.2\(49\)2023.293197](https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(49)2023.293197)

2. Бекетов, О. В., Лаухін, Д. В., Дадіверіна, Л. М., Козечко, В. І., & Тараненко, А. О. (2024). Дослідження взаємозв'язку між товщиною та структурним станом металопрокату з низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.26.1039

3. Козечко В.І. Особливості виробництва зварних труб великого діаметру та спосіб їх термічної обробки // Збірник наукових праць НГУ, №68-14, Дніпро, 2022, с. 157-165 [HTTPS://DOI.ORG/10.33271/CRPNMU/68.157](https://doi.org/10.33271/CRPNMU/68.157)

4. Козечко В. А. Особливості зміни мікроструктури і механічних характеристик при високоенергетичному навантаженні / В. А. Козечко, В. І. Козечко. // Збірник наукових праць НГУ. – 2023. – №74-1. – С. 154–162. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/74.154>

### Статті у виданнях включених до бази SCOPUS:

1. Beketov, O., Laukhin, D., Rott, N., Babenko, E., Kozechko, V. (2024). Use of the Processing Arrays Theory of Experimental Data for the Analysis of the Technological Scheme in the Rolled Metal Production – Controlled Rolling. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Pitel, J. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. DSMIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_13)

### Матеріали наукових конференцій:

1. Козечко В.І., Козечко В.А. Термічна обробка труб великого діаметру для магістральних трубопроводів: Abstracts of the Actual problems of practice and methods of their solution Milan 2022. Pp. 653–656.

2. Лаухін Д.В., Бекетов О.В., Дадіверіна Л.М., Козечко В.І. Special borders and multiple joints in hypoeutectoid ferrite // Збірник наукових праць II міжнародної науково практичної конференції «Розробка та дизайн сучасних матеріалів та виробів». – Дніпро: НТУ «ДП», 2023. – с 48-51.

3. Козечко В.І., Волинець А.В., Козечко В.А. Підвищення ефективності електроіскрового легування // Матеріали студентської науково-технічної конференції Тиждень студентської науки - 2021.

## ЗМІСТ:

ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТОВЩИНИ МЕТАЛОПРОКАТУ НА ПЕРСПЕКТИВУ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ В БУДІВЕЛЬНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЯХ.....	25
<b>1.1. ЗАСТОСУВАННЯ МАЛОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ БУДІВЕЛЬНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ .....</b>	<b>25</b>
<b>1.2. ТЕХНОЛОГІЧНІ СХЕМИ ВИРОБНИЦТВА ТОВСТОГО ЛИСТА З НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ МІКРОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ .....</b>	<b>27</b>
<b>1.3. ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛОПРОКАТУ РІЗНОЇ ТОВЩИНИ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ, У ТОМУ ЧИСЛІ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....</b>	<b>33</b>
<b>1.4. ОСНОВНІ МЕХАНІЗМИ РУЙНУВАННЯ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ.....</b>	<b>36</b>
<b>1.5. ВПЛИВ ЗОНИ ОСЬОВОЇ ЛІКВАЦІЇ НА ЗАРОДЖЕННЯ РУЙНУВАННЯ .....</b>	<b>39</b>
<b>1.6. ЗМІНА МЕХАНІЗМУ РУЙНУВАННЯ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ТОВЩИНИ МЕТАЛОПРОКАТУ .....</b>	<b>40</b>
<b>1.7. ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ .....</b>	<b>43</b>
РОЗДІЛ. 2 МАТЕРІАЛ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	46
<b>2.1. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ. МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ТА КОМПЛЕКСУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ.....</b>	<b>46</b>
<b>2.2. ДОСЛІДЖЕННЯ МОРФОЛОГІЇ СТРУКТУРНИХ СКЛАДОВИХ. ....</b>	<b>48</b>
<b>2.3. СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ МАСИВІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ.....</b>	<b>51</b>
<b>2.4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДОСЛІДЖУВАНИХ ПРОЦЕСІВ .....</b>	<b>52</b>
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТОВЩИНИ ПРОКАТУ НА СТРУКТУРУ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ МІКРОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ 10Г2ФБ В РІЗНИХ ТОВЩИНАХ.....	54

<b>3.1. ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ СТАЛІ 10Г2ФБ В РІЗНИХ ТОВЩИНА МЕТАЛОПРОКАТУ. ....</b>	<b>54</b>
<b>3.2. КІЛЬКІСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДСОТКОВОГО ВМІСТУ СТРУКТУРНИХ СКЛАДОВИХ З УРАХУВАННЯМ ТОВЩИНИ МЕТАЛОПРОКАТУ. ....</b>	<b>57</b>
<b>3.3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТОНКОЇ СТРУКТУРИ СТАЛІ 10Г2ФБ В РІЗНИХ ТОВЩИНА. ....</b>	<b>60</b>
<b>3.4. КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ РОЗМІРІВ СТРУКТУРНИХ СКЛАДОВИХ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ТОВЩИНИ МЕТАЛОПРОКАТУ. ....</b>	<b>64</b>
<b>3.5. ВИСНОВКИ. ....</b>	<b>67</b>
<b>РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАГАЛЬНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РУЙНУВАННЯ СТАЛІ 10Г2ФБ З УРАХУВАННЯМ ТОВЩИНИ МЕТАЛОПРОКАТУ. ....</b>	<b>69</b>
<b>4.1 . ФРАКТОГРАФІЧНИЙ АНАЛІЗ ПОВЕРХОНЬ РУЙНУВАННЯ СТАЛІ 10Г2ФБ В РІЗНИХ ТОВЩИНА. ....</b>	<b>69</b>
<b>4.2 . КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ НА КІНЕТИКУ ЗАРОДЖЕННЯ В'ЯЗКОГО РУЙНУВАННЯ. ....</b>	<b>74</b>
<b>4.3 . ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ЗАРОДЖЕННЯ В'ЯЗКОГО РУЙНУВАННЯ. ....</b>	<b>78</b>
<b>4.4 . ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ПОВІЛЬНОГО ЗРОСТАННЯ В'ЯЗКОЇ ТРИЩИНИ. ....</b>	<b>81</b>
<b>4.5 . ВИСНОВКИ. ....</b>	<b>83</b>
<b>РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛОПРОКАТУ РІЗНОЇ ТОВЩИНИ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ БУДІВЕЛЬНИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ. ....</b>	<b>85</b>
<b>5.1 . АНАЛІЗ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ТОВЩИНОЮ МЕТАЛОПРОКАТУ ТА КОМПЛЕКСОМ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ 10Г2ФБ. ....</b>	<b>85</b>
<b>5.2 ФОРМОУТВОРЕННЯ СТАЛЕВИХ КАРКАСІВ. ВИБІР КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ МОДЕЛЬНОГО РОЗРАХУНКУ. ....</b>	<b>89</b>
<b>5.3 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ МОДЕЛЬНОГО РОЗРАХУНКУ. ....</b>	<b>92</b>
<b>5.4 МОДЕЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК СТРОПВЛЬНОЇ ФЕРМИ. ....</b>	<b>95</b>

<b>5.5</b>	<b>МОДЕЛЬНА ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЛОПРОКАТУ РІЗНОЇ ТОВЩИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ</b> .....	98
<b>5.6</b>	<b>Висновки</b> .....	100
	<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ</b> .....	102
	<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	105
	<b>ДОДАТКИ</b> .....	118

## ВСТУП

Аналіз економічного розвитку України, показує гостру необхідність розширення галузей використання продуктів вітчизняної промисловості, зокрема металопрокату. Одним із можливих шляхів вирішення цього завдання є використання сталей вітчизняного виробництва у будівельній галузі, насамперед при будівництві багатоповерхових споруд. При цьому, вітчизняний металопрокат повинен бути конкурентоздатним у порівнянні з закордонними аналогами, як за комплексом властивостей, так і за собівартістю готових виробів. Однією з найважливіших вимог, що висувуються до сучасних будівельних сталей є здатність чинити опір руйнуванню при динамічних навантаженнях зварних двотаврових балок. При цьому опір матеріалу поширенню в ньому тріщин визначається його структурою, а саме морфологічними особливостями тонкої будови: розміром структурних складових, дисперсністю і розподілом неметалевих включень, типом внутрішньофазних та міжфазних границь, тобто кількістю та розподілом нанорозмірних структурних складових. Таким чином, дослідження спрямовані на підвищення механічних властивостей і розширення областей застосування прокату з низьковуглецевих мікролегованих сталей вітчизняного виробництва на основі встановлення взаємозалежностей між структурою та кінетикою розповсюдження тріщини при динамічних механічних руйнуваннях, актуальні як з наукової, економічної та загальнодержавної точок зору.

**Мета роботи** – стабілізація фізичної нелінійності для зварних будівельних металевих конструкцій на основі встановлення взаємозв'язку між товщиною металопрокату та загальними металофізичними принципами розповсюдження та концентрації пластичної деформації.

**Для досягнення поставленої мети в роботі було поставлено наступні задачі:**

1. Дослідити взаємозв'язок між товщиною металопрокату, розмірами та відсотковим співвідношенням структурних складових: провести комплекс

металографічних досліджень; виконати кількісний аналіз відсоткового співвідношення структурних складових в залежності від товщини листа.

2. Дослідити взаємозв'язок між товщиною металопрокату і комплексом характеристик міцності та пластичних властивостей низьковуглецевої мікролегованої сталі: провести кількісний аналіз розподілу відповідних характеристик в залежності від товщини листа; отримати відповідні математичні моделі.

3. Дослідити взаємозв'язок між товщиною металопрокату та ударною в'язкістю низьковуглецевої мікролегованої сталі: провести кількісний аналіз розподілу ударної в'язкості в залежності від товщини листа; дослідити зміни загальних характеристик зламів; отримати відповідні фізичні та математичні моделі; на підставі отриманих результатів побудувати загальну модель.

**Об'єкт дослідження** – процеси розповсюдження та концентрації пластичної деформації під дією зовнішнього навантаження з урахуванням структурного стану матеріалу.

**Предмет дослідження** – взаємозв'язок між товщиною металопрокату, заданим структурним станом та відповідним розподілом пластичних деформацій, які виникають під дію зовнішнього навантаження.

**Методи дослідження.** У роботі використано сучасні методи і методики досліджень: кількісний та якісний металографічний аналіз; растрова електронна мікроскопія; механічні випробування; статистичний аналіз масивів експериментальних даних; фізичне та математичне моделювання.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Результати досліджень увійшли та були прийняті до уваги при створенні освітньо-наукової програми підготовки докторів філософії за спеціальністю 132 "Матеріалознавство".

Крім того результати наукових досліджень увійшли до методичних розробок для підготовки магістрів спеціальності 132 Матеріалознавство, а саме:

1. Експертна оцінка матеріалів і виробів [Електронний ресурс] : методичні вказівки до виконання практичних робіт для здобувачів ступеня магістра



спеціальності 132 Матеріалознавство / уклад.: Д. В. Лаухін, Н. О. Ротт, К.А. Зіборов, В. І. Козечко ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2024 – 44 с.

2. Методичні рекомендації до виконання практичних робіт з дисципліни Методи структурного аналізу матеріалів для магістрів спеціальності 132 Матеріалознавство / В.А. Козечко, Козечко В.І. ; Нац.техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2024. – 69 с.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

Наукове значення роботи полягає у кількісному та якісному визначенні взаємозв'язку між параметрами структури будівельних сталей, які формуються під час термічної обробки металопрокату різної товщини, параметрами відповідних поверхонь руйнування та ударною в'язкістю листового прокату з низьковуглецевих мікролегованих сталей. У ході виконання роботи удосконалено загально прийняту теорію зародження та розповсюдження в'язкого руйнування за рахунок аналізу параметрів відповідного структурного стану. Запропоновані концепції містять урахування впливу пластичної деформації на відповідні стадії руйнування, а саме: зародження тріщини (енергетичні аспекти зародження мікропор); повільного зростання тріщини (пластичне деформування структурних складових); швидке зростання тріщини (одночасна дія двох механізмів – в'язкого та квазікрихкого). Під час виконання роботи одержані наступні нові наукові результати:

1. Удосконалено енергетичні аспекти теорії зародження мікропор на поверхнях розділу між матрицею і частинками при в'язкому руйнуванні низьковуглецевих мікролегованих сталей з урахуванням товщини металопрокату (*набуло подальшого розвитку*). Розроблена концепція відрізняється урахуванням не тільки типу зв'язку частки з матрицею, а й аналізом хімічного складу частки, її розмірами та спроможністю формувати пори, тобто бути потенціальними місцем для зародження в'язкої тріщини.

2. Концепція зв'язку між розповсюдженням пластичної деформації та параметрами структурних складових (*зроблено вперше*). Запропонована фізико-

математична модель враховує спроможність елементів структури низьковуглецевих мікролегованих сталей до опору розповсюдження в структурі пластичної деформації і, як наслідок, руйнування. Аналогічні моделі розповсюдження в'язкого руйнування зазначені факти не враховують.

3. Досліджено процес руйнування сталей у ферито-перлітному структурному стані з урахуванням товщини металопрокату з точки зору проходження тріщиною трьох послідовних стадій: зародження, повільного зростання та швидкого зростання (*набуло подальшого розвитку*). Отримані фізичні моделі враховують вплив геометричних розмірів та відсоткового вмісту структурних складових низьковуглецевих мікролегованих сталей на зародження (формування мікротріщин за квазікрихким механізмом руйнування) та розповсюдження руйнування (розподіл пластичної деформації по структурним складовим).

4. Побудовано та проаналізовано фізико-математичні моделі впливу параметрів структури на ударну в'язкість низьковуглецевих мікролегованих сталей з урахуванням товщини металопрокату (*зроблено вперше*). Запропонована концепція базується на результатах комплексних досліджень поверхонь зламів, відповідних дослідженнях структурного стану та теоретичному аналізу можливих механізмів, які працюють під час руйнування низьковуглецевих мікролегованих сталей.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

Практичне значення роботи спрямовано на підвищення механічних властивостей і розширення областей застосування прокату з низьковуглецевих мікролегованих сталей вітчизняного виробництва на основі встановлення взаємозалежностей між структурою та кінетикою розповсюдження тріщини при динамічних механічних руйнуваннях, а саме:

1. Розроблено фізико-математичні моделі визначення взаємозв'язку між параметрами структури та ударною в'язкістю металопрокату для будівельних металевих конструкцій (впроваджено в практику ТОВ «Сінерджі Ер Енд Ді»).

2. Отримано графоаналітичні залежності між геометричними розмірами, відсотковим вмістом структурних складових низьковуглецевих мікролегованих сталей та загальними характеристиками в'язкого руйнування.

3. В роботі показано, що використання високоміцних високов'язких сталей з різними товщинами конструктивних елементів може призвести до зниження вартості готового виробу більш ніж на 20% в порівнянні з класичним варіантом компоновки, що є суттєвим результатом для економіки підприємства. (впроваджено на ТОВ «Катаріос Транс»)

4. Розроблено рекомендації щодо використання отриманих наукових результатів при розробці технологічних схем виробництва металопрокату різної товщини для будівельної галузі, які забезпечують отримання сталей з підвищеним рівнем механічних властивостей.

5. Отримані результати дослідження прийняті до уваги та увійшли до освітньо-наукової програми зі спеціальності 132 Матеріалознавство для підготовки докторів філософії.

6. Отриманні результати впроваджено у навчальний процес кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну НТУ «Дніпровська політехніка» при підготовці наступних дисциплін: «Експертна оцінка матеріалів і виробів», «Методи структурного аналізу матеріалів».

#### **Особистий внесок здобувача.**

Основні результати дисертаційної роботи були отримані здобувачем самостійно. При проведенні досліджень, результати яких опубліковані в співавторстві, авторові належать розробка і перевірка адекватності фізичних і математичних моделей відповідних процесів, здійснення та інтерпретація результатів структурних та фрактографічних досліджень, проведення комплексу механічних випробувань.

#### **Апробація результатів дисертації.**

Високий ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень і результатів експериментальних досліджень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі, забезпечується використанням

сучасних методів і методик досліджень, апаратури, лабораторного устаткування, обчислювальної техніки і програмного забезпечення, відповідністю результатів емпіричних і експериментальних досліджень, чітким трактуванням отриманих результатів, які не суперечать загальноприйнятим науковим положенням, а також досвідом практичного використання отриманих результатів і їх апробацією на IV міжнародній науковій конференції «Actual problems of practice and science and methods of the solution» (м. Мілан, Італія, 2022р.), II міжнародна науково-практична конференція «Розробка та дизайн сучасних матеріалів та виробів» (м. Дніпро, Україна, 2023р.), Студентська науково-технічна конференція «Тиждень студентської науки» (м. Дніпро, Україна, 2021).

Публікації. основні положення дисертації опубліковані в 5 наукових працях. Серед них: 1 стаття у виданні що індексується Scopus, 4 статті у фахових виданнях, що відповідають переліку ДАК МОН України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 131 найменувань. Загальний обсяг роботи складає 119 сторінок, у тому числі 37 рисунків і 18 таблиць.

Автор висловлює щире подяку проф. Лаухіну Д.В., доц. Бекетову О. В. та ін. за цінні зауваження та допомогу у проведенні теоретичних та експериментальних досліджень.

## РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТОВЩИНИ МЕТАЛОПРОКАТУ НА ПЕРСПЕКТИВУ  
ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ В БУДІВЕЛЬНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЯХ**1.1. Застосування маловуглецевих сталей при виготовленні  
будівельних металоконструкцій**

В основу індустріального будівництва покладена збірність конструкцій із готових елементів. Первинним елементом сталевих конструкцій є сталь прокатна, листова або фасонна, що одержана з металургійних заводів. Сталь, що використовується в металевих конструкціях поділяється на дві групи:

1. Сталь товстолистова, що прокатується між двома валками та універсальна (широкополосна), яка прокатується між чотирма валками у вигляді широкої полоси прямокутного перерізу.

2. Сталь профільна: кутики, швелери, двотаври, таври та ін. [1].

Форма й конструктивне рішення металоконструкцій залежить в основному від призначення. Так, наприклад, можна виділити:

- елементи металічних або змішаних каркасів промислових будівель – балки, прогони, ферми, ригелі, колони, зв'язки та ін.;
- листові конструкції, до яких відносяться трубопроводи та деталі для сполучення великих діаметрів, ємності для зберігання рідин (резервуари), газів (газгольдери), сипучих матеріалів (бункери та силоси), споруди і установки металургійних, нафтопереробних, хімічних виробництв, об'єктів енергетики;
- висотні споруди – башні і мачти ліній радіо- і телезв'язку, лінії електропередач, бурові вишки, геодезичні вишки та вентиляційні труби;
- конструкції мостів, естакади підприємств;
- конструкції каркасів;
- рухомі конструкції мостових, баштових кранів, крупних екскаваторів;
- гідротехнічні споруди та ін.;
- великопрогонні конструкції покриттів ангарів, цехів авіа-, судно- і машинобудування, лабораторій, громадських споруд;

- інші конструкції, до яких пред'являють особливі вимоги, наприклад, пов'язані з вивченням космосу, атомною енергетикою і т.д.

Металеві конструкції виготовляють із готових прокатних, пресованих або гнутих профілів, частіше всього на високо механізованих підприємствах і поставляються споживачу з високою мірою заводської готовності [2, 3].

Типи прокатуваних профілів в значній мірі визначають конструктивну форму елементів споруд. Різноманітність профілів, марок сталей та раціональність їх перетинів сприяє проектуванню економічно-вигідних конструкцій.

Основні вимоги до металевих конструкцій можна сформулювати наступним чином [4]:

- задовольняюча вимогам нормативної документації витрималість, надійність та довговічність конструкцій;
- мінімальна вартість;
- висока технологічність монтажу.

При виборі сталі для проектування висотних та великопрогонних будівель доцільно віддавати перевагу низьковуглецевим мікролегованим сталям, так як вони при однаковому рівні міцності із будівельними сталями, мають більш високий рівень пластичності. Не дивлячись на порівняно високу вартість цих сталей, використання їх в промисловому і громадському будівництві є економічно доцільним, завдяки економії грошових засобів при зниженні поперечного перетину елементів конструкції, монтажу, транспортних витрат, зварювальних робіт, об'єму матеріалу, що наплавляється та ін. [5].

Разом с цим, проблема використання високоміцних мікролегованих сталей, особливо нафтового сортаменту, в будівництві полягає в анізотропії властивостей металопрокату [6]. Тобто, при виробництві зварних металевих конструкцій із зазначеного типу сталей та подальшої їх експлуатації може постати проблема фізичної нелінійності (термінологія згідно вимог [7]). Отже, для використання товстого листа в будівельних конструкціях необхідно отримати такий структурний стан металу, при якому будуть забезпечені

механічні властивості в трьох напрямках: вздовж, впоперек та по товщині прокату.

Як правило, будівельні сталі підвищеної міцності поставляють в гарячекатаному стані згідно вимог [8]. Структура даного типу металопродукту являє собою ферито-перлітну суміш, с балом зерна №8...10 (діаметр зерна 10...20 мкм) або с балом зерна №10...12 (діаметр зерна 8...10 мкм) [9].

## **1.2. Технологічні схеми виробництва товстого листа з низьковуглецевих мікролегованих сталей**

Технологічний процес виробництва товстолистого прокату варто розглядати як сукупність процесів, що чергуються, термомеханічного й термічного впливу на метал, у результаті яких формується певний структурний стан і відповідний рівень властивостей прокату. На рис. 1.1 представлена схема виробництва товстого листа із цих позицій.

У цій схемі сполучаються процеси високо і низькотемпературної термомеханічної обробки з наступним або попереднім нагріванням. Особливістю процесів є те, що відбуваються вони в умовах безперервного охолодження з різними схемами пластичної деформації: прокаткою й циклічним вигином [10].

Метою термічної й термомеханічної обробки є формування необхідного структурного стану сталі, що забезпечує заданий комплекс властивостей товстолистого прокату й дозволяє повністю реалізувати потенційні можливості металу.

Основними видами термічної обробки на металургійних заводах є нормалізація й загартування з відпусканням (поліпшенням) [11].

Нормалізація полягає в нагріванні листів до температур вище  $A_{с3}$  з витримкою для завершення фазових перетворень і наступним охолодженням на повітрі. Нормалізація забезпечує здрібнювання ферито-перлітної структури й тим самим підвищення пластичності й ударної в'язкості при нормальних і знижених температурах. Нормалізація підвищує також рівномірність і

однорідність структури й властивостей металу в порівнянні з гарячекатаним станом. Регульованими технологічними параметрами процесу нормалізації є температура, тривалість нагрівання й швидкість охолодження [12]. Практично температуру нагрівання встановлюють залежно від коливань хімічного складу в межах марочного змісту елементів, керуючись емпіричними залежностями у вигляді вуглецевого еквівалента або суми змістів окремих елементів [13].

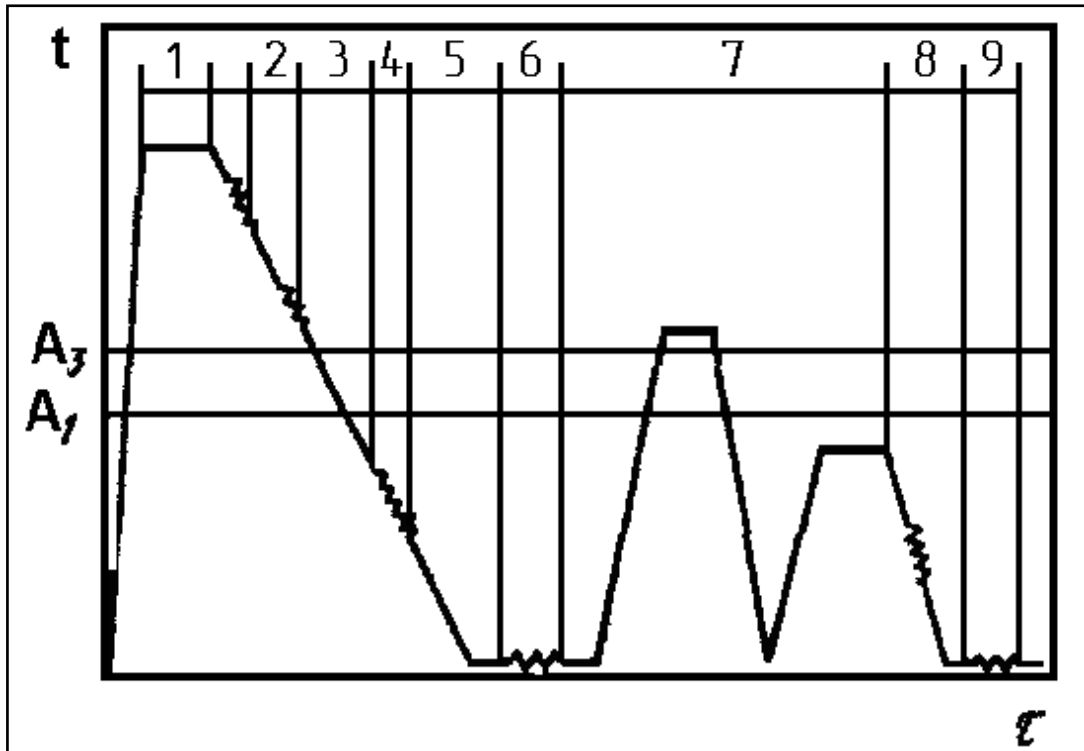


Рис. 1.1. Схема термічних і термомеханічних процесів при виробництві товстого листа: 1 - нагрівання слябів; 2 - прокатка; 3 - охолодження; 4 - гаряче виправлення; 5 - охолодження після виправлення; 6 - холодне виправлення; 7 - термообробка; 8 - охолодження й гаряче виправлення; 9 - холодне виправлення [10].

Тривалість нагрівання визначається необхідністю нагріву металу до заданої температури й повного завершення процесів структуроутворення. Час нагрівання залежить від теплової потужності печі, а час процесів структуроутворення визначається хімічним складом і зі збільшенням ступеня легованості сталі збільшується.



Підвищення температури гарячого прокату, особливо до температур міжкритичного інтервалу, приводить до зниження ударної в'язкості, а в ряді випадків – зниження пластичності та зміцнюючих характеристик до рівня гарячекатаного стану й навіть нижче [14].

Швидкість охолодження визначає ступінь подрібнювання й характер одержаних структур сталі. Як правило, листи при нормалізації охолоджують на повітрі при переміщенні їх по рольгангах або на холодильниках. Відзначається істотна залежність швидкості охолодження поверхні від наявності на ній нагару [15], а також конкретних виробничих умов. При інших рівних умовах зі збільшенням товщини листа швидкість охолодження металу знижується й відповідно зменшується ступінь подрібнювання структури сталі й ефективність нормалізації.

У практиці при нормалізації товстих листів швидкість охолодження як технологічний параметр не регламентується, а визначається можливостями встановленого устаткування і виробничих умов. У ряді випадків у технологічних інструкціях передбачається застосування прискореного охолодження після нормалізації для листів підвищених товщин.

Загартування з високим відпуском (поліпшення) полягає в нагріванні листів до температури вище  $A_{c3}$  із необхідною витримкою й швидким охолодженням у воді з наступним відпуском при температурах нижче  $A_{c1}$ . Цей вид термообробки забезпечує одержання дрібнодисперсних структур і супроводжується підвищенням як зміцнювальних, так і в'язкісних властивостей сталі одночасно [16].

Регульованими технологічними параметрами процесу є температура й тривалість нагрівання металу під загартування, при відпустці і швидкість охолодження при загартуванні. Питомий час нагрівання під загартування трохи вище, ніж при нормалізації і перебуває в межах 1-2,5 хв/мм, а при відпусканні 3—6 хв/мм. При ускладненні хімічного складу й збільшенні розмірів листа питомий час приймають ближче до верхньої межі. Загартування з відпусткою як вид термообробки є технологічно й технічно більш складним процесом, ніж

нормалізація. Найважливішим технологічним елементом процесу є загартування, яке здійснюють шляхом охолодження листів водою в загартувальних баках, пресах або роликово-загартувальних машинах. [17].

Завершальною операцією поліпшення є відпуск [18]. При відпусканні відбувається зняття напруг і розпад продуктів загартування, що супроводжується підвищенням пластичності й ударної в'язкості сталі. При цьому, слід зазначити що розподіл властивостей по товщині, зокрема твердості, обумовлений прогартованістю сталі, після відпускання повинен зберігатися [18, 19].

Прискорене охолодження листів, як технологічний процес, припускає за рахунок збільшення швидкості охолодження, досягнення додаткового подрібнювання структури. Як наслідок, відбуваються зміни характеру й співвідношення структурних складових, внаслідок чого металопрокат набуває необхідного комплексу властивостей без наступного відпуску [20]. Від нормалізації цей процес відрізняється більш високими швидкостями охолодження, а від загартування – більш низькими і відсутністю наступного відпуску. Прискорене охолодження товстих листів супроводжується підвищенням зміцнюючих характеристик і в ряді випадків ударної в'язкості (при подрібнюванні ферито-перлітної структури, усуненні різнозернистості) [21].

Розрізняють прискорене охолодження двох типів – перерване і безперервне. Для здійснення в потоці прокатного стану перерване охолодження є кращим, тому що припускає інтенсивне охолодження до певних температур з наступним охолодженням на повітрі [22]. Недоліком такого типу охолодження є підвищена нерівномірність властивостей у порівнянні з безперервним охолодженням [23]. Безперервне охолодження передбачає повне охолодження листів з постійною швидкістю [24]. При цьому необхідно регулювати швидкості охолодження металу в широкому діапазоні залежно від товщини листа й необхідного комплексу властивостей.

Термомеханічна обробка є одним з найбільш перспективних методів зміцнюючої обробки, тому що в певних умовах може істотно поліпшити комплекс механічних властивостей у порівнянні з одержуваним при звичайній

термообробці або гарячій прокатці. У практиці виробництва товстолистового прокату найбільш реальним є використання ефекту високотемпературної термомеханічної обробки (ВТМО) [25]. Основний етап ВТМО – гаряча деформація аустеніту залежно від ступеня й швидкості деформації, тривалості після і міждеформаційних витримок, швидкості охолодження в процесі і після деформації зумовлює різний структурний стан аустеніту і продуктів його розпаду. Залежно від сполучення перерахованих параметрів можна чекати підвищення міцності без зміни пластичності і в'язкості при перекристалізованому аустеніті, одночасне підвищення зміцнюючих і в'язучих властивостей при формуванні однорідного і дрібнозернистого аустеніту і погіршення властивостей при різнозернистій структурі рекристалізованого аустеніту [26].

Для будівельних сталей підвищеної міцності найбільше значення має збільшення їх границі плинності. Сприятливий вплив на підвищення границі плинності сталі і на підвищення опору крихкому руйнуванню чинить подрібнення феритних зерен. Це сприяє введенню мілкозернистих сталей в будівельне виробництво. Подрібнення зерна є одним із ефективних способів керування структурою, який приводить до одночасного підвищення міцності і в'язкості низьколегованих сталей, і, як наслідок, до підвищення опору крихкому руйнуванню. Для подрібнення зерна використовуються такі ефективні добавки як ніобій, ванадій і титан. Ці добавки сприяють дисперсійному зміцненню, підвищенню границі плинності сталі. Найбільшу зацікавленість в якості мікролегованої добавки викликає ніобій, так як він дозволяє підвищувати комплекс механічних властивостей сталей в процесі гарячої прокатки [25, 26]. Таким чином, збільшення вимог, що пред'являються до механічних і технологічних властивостей низьколегованих сталей, а також необхідність отримання в процесі гарячої прокатки дрібного зерна фериту у поєднанні з ефектом дисперсійного зміцнення ніобієвої сталі привели до розробки технології контрольованої прокатки [25, 26].

В процесі контрольованої прокатки створюється велика кількість центрів

кристалізації при утворенні фериту; деформація раніш утвореного фериту супроводжується збільшенням густини дислокацій і появою субструктури. Завдяки зниженому вмісту вуглецю значно поліпшується зварюваність. Для низьколегованих сталей підвищеної міцності, особливо у вигляді товстолистового прокату, характерним є розшарування при згинанні і недолік пластичності по товщині прокату. Це пов'язано з наявністю витягнутих у напрямку прокатки включень або вузьких смуг сульфідних включень, особливо у вигляді безперервних рядкових виділень, які виникають внаслідок контрольованої прокатки [29-31].

В основному, при виробництві товстолистового прокату із маловуглецевої низьколегованої сталі, реалізуються наступні схеми контрольованої прокатки [32, 33]:

- контрольована прокатка із завершенням гарячої деформації в аустенітній області для отримання дрібнозернистої, переважно рекристалізованої структури аустеніту. Спеціально підібраним хімічним складом сталі досягається ефективне гальмування росту зерна аустеніту, а також дисперсійне зміцнення при наступному прискореному охолодженні;

- контрольована прокатка із завершенням деформації в нижній частині аустенітної області для отримання частково рекристалізованої та полігонізованої структури аустеніту;

- контрольована прокатка із завершенням деформації в двофазній області. В цьому випадку практично весь об'єм фериту піддається наклепу. Як наслідок, в ньому формується субзеренна структура, а при більш низьких температурах, коли процес полігонізації загальмований, формується дислокаційна структура.

При гарячій прокатці листової сталі температура нагрівання слябів визначається хімічним складом сталі і допускається в межах 1150-1250°C; максимальною величиною слід вважати 1280°C, так як вище цієї температури буде відбуватися небажаний процес перегріву металу, сприяючий появленню перепалу. Тривалість нагріву металу залежить від температури слябів при посадці, їх товщини і головним чином хімічного складу. Для прокатки

товстолистової сталі використовують двох-, трьох- та чотирьох клітьові стани [33]. Температура сляба, який поступає в чорнову кліть 1180 °С; загальна кількість пропусків в чорновій кліті з врахуванням розбивки ширини 11-13; температура кінця прокатки в чорновій кліті 1050-970°С. Потім на максимальній швидкості рольгангу розкат направляється в чистову кліть. В чистовій кліті докатується за 5-7 пропусків; температура кінця прокатки відповідно 850-750°С [32, 33].

### **1.3. Використання металопрокату різної товщини при виробництві будівельних конструкцій, у тому числі відповідального призначення**

Товсті листи мають широкий спектр застосування. Вони можуть утворювати як перерізи несучих елементів конструкцій так і щільно-міцні оболонки, що застосовуються для зберігання, перевантаження, транспортування та переробки рідких, газоподібних і сипучих речовин [34].

Номенклатура листових конструкцій може бути представлена в наступному вигляді:

- будівельні металокопункції – зварні балки, колони, ферми;
- резервуари для зберігання різноманітних рідин (нафтопродуктів, води, олив, спирту і др.);
- газгольдери для зберігання і вирівнювання складу газів;
- бункери і силоси для зберігання і перевантаження сипучих тіл (руди, вугля, коксу, флюсів, цементу, піску і т.д.);
- трубопроводи великого діаметру ( $d \geq 0,6$  м) для транспортування води, газу, торфу і т.п., які використовуються в металургійних, коксохімічних, торфодобувних та інших підприємствах;
- листові копункції чорної і кольорової металургії, хімічної, нафтової та інших видів промисловості – домни, повітрянагрівачі, пиловловлювачі, димові труби і т.д [35].

Стосовно будівництва, товстолистовий металопрокат, в основному, застосовується при виробництві зварних конструкцій каркасів будівель і споруд [36].

Товсті листи застосовують в колонах, які входять в склад конструктивних комплексів і працюють на центральне стиснення. Колони передають навантаження від верхньої конструкції на фундаменти. Колони складаються з трьох частин, визначених їх призначенням: оголовка, на якій опирається верхня конструкція, яка навантажує колону; стержень – основний конструктивний елемент, який передає навантаження від оголовка до бази; база – передає навантаження від стержня на фундамент. Товсті листи використовуються в усіх трьох частинах колони [4, 7, 8, 9, 34].

Перетин суцільної колони проектується у вигляді широкополічного двотавра, який частіше всього є зварним і являється зручним у виготовленні з допомогою автоматичної зварки і дозволяє виконувати примикання підтримуючих конструкцій [37]. Зварні колони, які складаються з трьох листів, достатньо економічні по витраті матеріалу, так як можуть мати розвинені перетини, що забезпечують колоні необхідну жорсткість. Рівностійкими в двох напрямленнях, а також простими у виготовленні, є колони хрестового перетину, зварені з трьох листів, та коробчастий, зварений з чотирьох листів [37, 38].

Товсті листи також використовуються у важких фермах, стрижні яких складаються з декількох елементів, що обумовлено їх великими розрахунковими довжинами та діючими в них значними зусиллями. Пояси важких ферм мають в різних панелях різні перетини, зв'язані між собою спільністю типу та умовами сполучення стрижнів у вузлах [39].

Зварні балки таврового і двотаврового перетину виготовляються з попередньо розкритої на полоси товстолистової сталі товщиною 8-80 мм. Основними перевагами зварних балок є: можливість підібрати оптимальний перетин балки, завдяки чому вага конструкції може знизитись до 10%; можливість одержання бісталевої балки, звареної із різних марок сталі, коли найбільш напружені ділянки балки виготовляються із сталі підвищеної міцності,

а найменш напружені – з маловуглецевої сталі, що дозволяє знизити вартість балки; можливість виготовлення балки змінного перерізу [40]. Зварні балки виготовляють з товщиною стінки 8-20 мм, з товщиною полиці 10-80 мм, шириною полицки 200-800 мм, висотою стінки 200-1500 мм та довжиною 2000-15000 мм [4, 7, 8, 9, 34].

В балках втратити стійкість можуть: стиснутий пояс під дією нормальних напружень та стінка під дією дотичних та нормальних напружень, а також під їх спільним впливом. Втрата стійкості одним з елементів балки повністю або частково виводить його з роботи, робочий перетин балки зменшується, часто стає несиметричним, центр вигину зміщується і це може призвести до передчасної втрати несучої здатності всієї балки [4, 7, 8, 9, 34]. Так, на рис. 1.2 наведено приклад розподілу зусиль при передачі зосередженого навантаження на стінку балки.

При цьому слід зазначити, що діюча на теперішній час нормативна документація передбачає при проектуванні зварних будівельних металевих конструкцій застосування металопрокату однакової товщини по перерізу елементів конструкцій [7, 41, 42]. Однак, дослідження розподілу зовнішнього навантаження по перерізу конструкцій [43] показує, що у деяких випадках слід застосувати при виробництві листи різної товщини. Разом з цим, зміна товщини листів при виробництві металевих конструкцій може призвести до так званого «краєвого» ефекту. Так, в роботі [44] показано, що в сполученнях різних оболонок при зміні товщини листів виникають місцеві напруження краєвого ефекту, швидкозгасаючі при віддаленні від краю (тому такий напружений стан і називається краєвим ефектом).

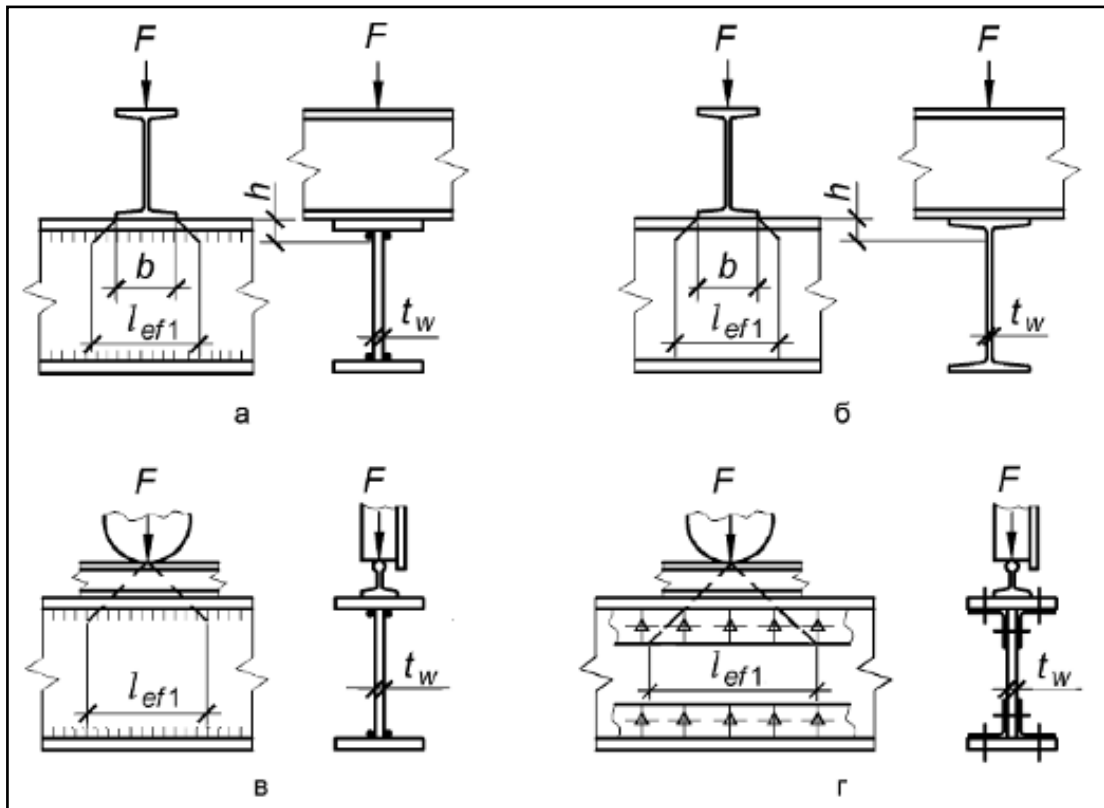


Рис. 1.2. Схема передачі зосередженого навантаження на стінку балки [7]: а – зварної; б – прокатної; в – зварної або прокатної від колеса крана; г – з болтовими фрикційними поясами з'єднаннями від колеса крана

При розгляді краєвих ефектів слід дослідити взаємозв'язок між напружено-деформованим станом, який виникає під впливом зовнішнього навантаження та загальними особливостями кінетики руйнування з урахуванням товщини металопрокату.

#### 1.4. Основні механізми руйнування металоконструкцій

Метою розрахунку будівельних конструкцій є забезпечення заданих умов експлуатації та необхідної міцності при мінімальній витраті матеріалів та мінімальній витраті труду на виготовлення і монтаж.

Згідно вимог нормативної документації [4, 7, 8, 9, 34] будівельні конструкції та основи розраховують на силові та інші впливи, які визначають їх напружений стан та деформації, по граничним станам. Під граничними станами розуміють такі стани, при яких конструкції або основи перестають задовольняти



пред'явленим до них в процесі експлуатації або при зведенні вимогам, заданим в відповідності із значенням та відповідальністю споруд.

В розрахунках конструкцій на дію статичних та динамічних навантажень і впливів, яким вони можуть піддаватися на під час будівництва та всього терміну служби, враховуються наступні граничні стани [4, 7, 8, 9, 34]:

- перший граничний стан — по несучій здатності (міцності, стійкості, витривалості), — при досягненні якого конструкція втрачає здатність опиратися зовнішнім впливам або отримує такі залишкові зміни, які не допускають можливості подальшої експлуатації;
- другий граничний стан — по розвиненню надмірних деформацій від пластичних и динамічних навантажень, — при досягненні якого в конструкції, що зберігає міцність та стійкість, з'являються деформації або коливання (прогини, осад, кути оберту), які виключають можливість подальшої експлуатації.

Кожний з цих граничних станів характеризується граничною умовою, яка вказує, що для того, щоб була ймовірною безпечна експлуатація, силові фактори, що діють на споруду або конструкцію, повинні бути меншими граничної величини, яка обмежує можливість експлуатації, а в граничному стані – рівними цій величині. Так, наприклад, для першого граничного стану при пластичній роботі матеріалу ця умова має вигляд рівняння 1.1 [34]:

$$N \leq \phi \quad (1.1)$$

де,  $N$  — зусилля в елементі конструкції, який розглядається (функція навантаження, яке діє на споруду);  $\phi$  — граничне зусилля, яке сприймається матеріалом елемента що розглядається та визначаюче несучу здатність елемента в залежності від появи надмірних зростаючих деформацій, при яких конструкція вже не може чинити опір навантаженню (функція властивостей матеріалу та розмірів елемента).

У випадках, коли матеріал має крихкий характер роботи та можливість раптового руйнування, у граничну функцію  $\phi$  слід включити опір матеріалу, який дещо менший за руйнівний, щоб забезпечити припинення експлуатації до

настання руйнування конструкції.

Руйнування матеріалу можливе [45]:

- крихке — від відриву, який утворюється тоді, коли відстань між двома елементами тіла, які розташовані в напрямленні силової дії, збільшиться в результаті цієї дії настільки, що сили зчеплення між елементами опиняться погашеними; руйнуванню від відриву відповідає друга теорія міцності (теорія найбільших подовжень). Тріщини I типу, які утворюються при нормальних напруженнях, коли границі тріщини переміщуються перпендикулярно площині тріщини (рис 1.3 а);
- пластичне — від зсуву, який утворюється тоді, коли буде перевищений опір взаємного зсуву двох суміжних елементів тіла. Тріщина II типу, виникає при плоскому зсуві, переміщення границь тріщини відбувається в площині перпендикулярній її фронтальній лінії (рис 1.3 б);
- руйнування зрізом – виникає при антипласкій деформації, при якій одна поверхня ковзає по другій паралельно фронту тріщини (рис 1.1 в).

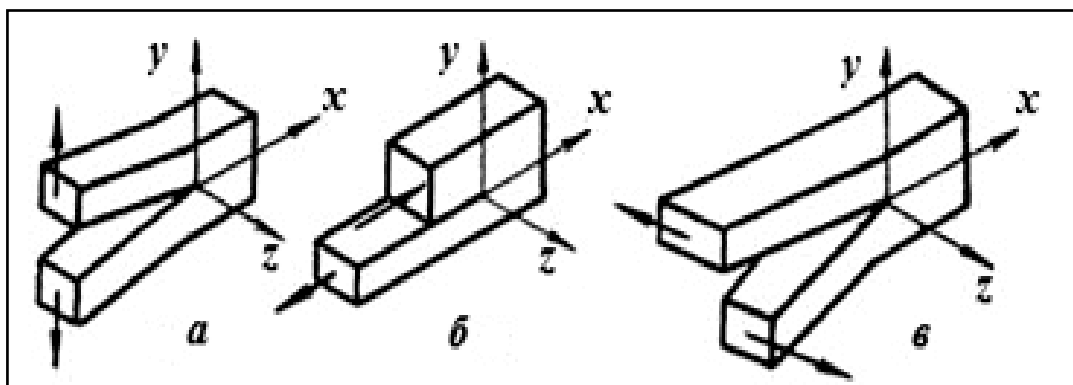


Рис 1.3. Основні види зміщень поверхонь тріщини [45]: а – простий відрив; б – простий зсув; в – простий зріз.

Один и той же матеріал може руйнуватися і крихо і пластично в залежності від умов, в яких відбувається руйнування [46]. Сталь при звичайній температурі, при правильній формі деталей (стрижнів) і в простих випадках дії сил (розтяг, стискання, кручення або вигин) чинить менший опір зсуву, ніж відриву, і руйнується пластично. Однак, при знижених температурах, при неправильній

формі деталей (конструктивно може перешкоджати деформації зсуву), при ускладнених величина опору зсуву може збільшуватися, що призведе крихко або квазікрихкого руйнування матеріалу [47].

Тривалі деформації при пластичному руйнуванні призводять до того, що матеріал конструкції майже ніколи не доходить до повного фізичного руйнування, оскільки через значні деформації конструкція втрачає несучу здатність ще до свого руйнування, і можливість її подальшої експлуатації виключається [48].

### **1.5. Вплив зони осьової ліквації на зародження руйнування**

Заготовкою із якої катають товсті листи слугує безперервнолитий сляб. При твердненні безперервнолитих слябів умови кристалізації викликають виникнення зони осьової ліквації, внаслідок нерівномірності охолодження заготовки і збагачення рідини перед фронтом кристалізації домішками (сірка, фосфор, кольорові метали) і легуючими елементами (вуглецем, марганцем, кремнієм та ін.) [49]. Осьова ліквація відбивається на неоднорідності структури по товщині листа і морфології неметалевих включень у осьовій зоні. Не дивлячись на незначну товщину лікваційної зони (10-250 мкм), її вплив на механічні характеристики в напрямку товщини прокату ( $Z$ -напрямок) виявляється вирішальним у зв'язку з утворенням в ній мікротріщин, приходящих до низько-енергоємного руйнування [50]. Так, наприклад в роботі [51] зниження властивостей прокату в  $Z$ -напрямку обумовлено наявністю в зоні осьової ліквації плоских гострокутних виділень  $Ti(CN)$  і  $MnS$ , ініціюючих утворення мікротріщин, які призводять до низько-енергоємного руйнування. У осьовій зоні спостерігається зниження таких структурно-чутливих властивостей сталі, як відносне звуження та ударна в'язкість  $KCVZ$  [52]. Товстолистовий прокат з безперервнолитих сталей в ряді випадків характеризується аномально низькою пластичністю в  $Z$ -напрявленні (див. наприклад результати роботи [53]).

Хімічна неоднорідність зони осьової ліквації впливає на стійкість в ній аустеніту, змінюючи кінетику та механізм перетворень в ділянках різного

хімічного складу в умовах охолодження листів після кінця прокатки [54]. Збільшення кількості вуглецю, наявність водню та легуючих елементів (титану, кремнію, марганцю) сприяє зміні термодинамічних умов охолодження та забезпечує часткове гальмування дифузійного перетворення аустеніту та переохолодження окремих його ділянок до температури утворення бейніту і навіть мартенситу, а також перешкоджати дифузії водню [54, 55]. Утворена структурна неоднорідність сприяє появі мікротріщин. Крім того, осьова зона листів характеризувалась не тільки структурною несучільністю, але й підвищеною забрудненістю включеннями сульфідів, оксидів, силікатів та нітридів [56]. При цьому слід зазначити, що тріщини переважно утворюються на включеннях сульфідів марганцю та карбонітридів титану, виявлених на поверхні зламу, який пройшов по осьовій зоні [57].

#### **1.6. Зміна механізму руйнування в залежності від товщини металопрокату**

Товщина листа впливає на в'язкість руйнування. Це явище було виявлене експериментами Ірвіна, які виконували на постарілому алюмінієвому сплаві (7075-T6) [58]. Дані, щодо цього експерименту узагальнено та проаналізовано в роботі [59]. На рис. 1.4 наведено графічний аналіз зміни в'язкості алюмінієвого сплаву з товщиною (див. роботу [59]).

Згідно даних роботи [59] в області А, в якій товщина зразків мала, в тонких перерізах напруга в напрямку товщини прагне до нуля і напружений стан здебільшого плоский. Зразок, можна вважати, складається з двох вільних поверхонь, фактично він піддається деформації (поздовжньому вигину), що знімає всі напруги в напрямку товщини. Тріщина поширюється по нормалі до  $X_1$  в деякій площині  $X_1X_2$ . Таким чином, руйнування тонких пластин буде відбуватися за механізмом простого зрізу (див. рис. 1.3 в). Зазначений підхід був застосовано Білбі з співробітниками при дослідженні руйнування тонких пластин промислового виробництва [60]. Головною рухомою силою руйнування, при цьому, розглядалися гвинтові дислокації. За рахунок власної дислокаційної

природи, тріщина буде розвиватися з прискоренням, так як в цей процес кожна дислокація вносить свій вклад до тих пір, поки не відбувається руйнування матеріалу [60].

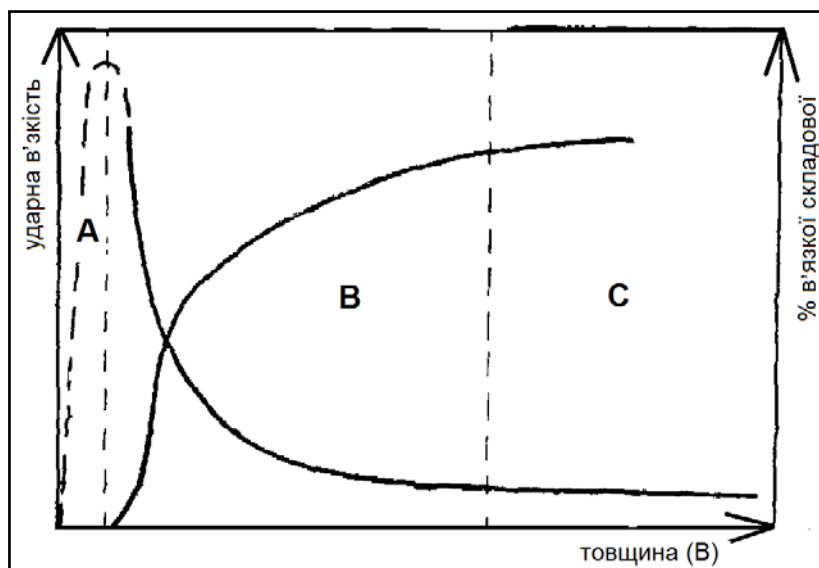


Рис. 1.4. Залежність в'язкості руйнування алюмінієвого сплаву 7075 від товщини зразка [59]

Ця модель може виявитися не зовсім придатною, оскільки руйнуванню шляхом простого зрізу іноді передують утворення шийки і локальне зменшення товщини смуги біля вершини тріщини [61]. Сам по собі матеріал повністю пластичний, але поєднання тонкої пластини, довгої попередньої тріщини і м'якої системи навантаження може привести до крихкого руйнування [62].

В області В (рис. 1.4) товщина зразка така, що центральна область і краї кратні за розмірами. Внаслідок цього, при прикладенні навантаження в центрі зразка тріщина може поширитися на деяку довжину шляхом відриву (див рис. 1.3 а). При цьому, якщо руйнування відривом розвивається швидко, то на кривій навантаження - зсув може виникнути майданчик при постійному навантаженні. Це явище відоме під назвою «стрибок тріщини» [63]. Бічні перемички, як наслідок, можуть бути розірвані шляхом зсуву при досягненні досить великого ступеню дотичних напруг у вершини тріщини (рис. 1.6). Таким чином, тріщина розповсюджується змішаним шляхом – простим відривом у поєднанні з

«гальмуванням» за механізмом простого зсуву [59].

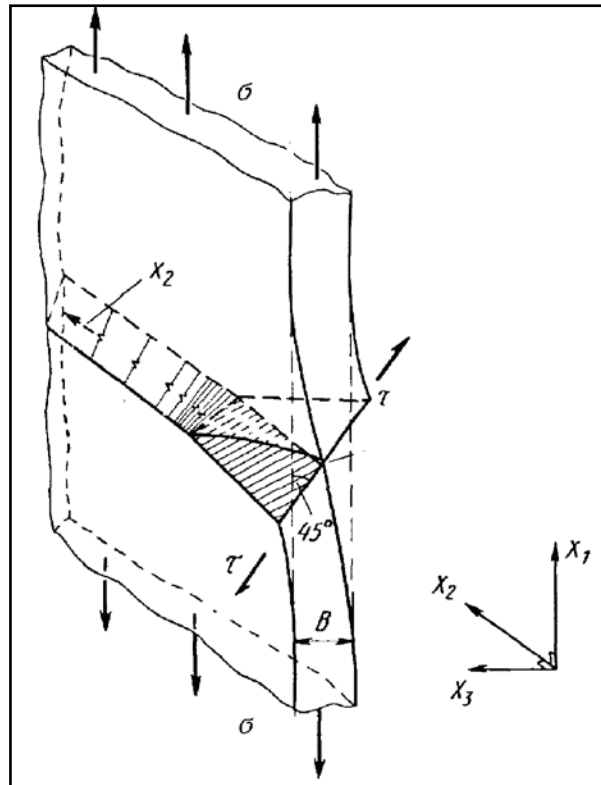


Рис. 1.5. Фізична модель руйнування в області А (див. рис. 1.4) [59]

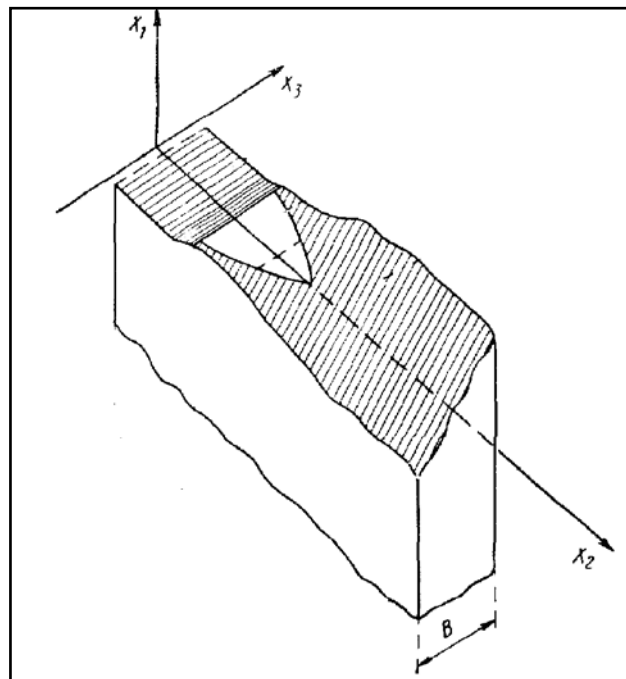


Рис. 1.6. Фізична модель руйнування в області В (див. рис. 1.4) [59]

В області С (рис. 1.3 в) товщина зразків більше, так що практично весь навантажений перетин деформується в умовах плоскої деформації. В центрі

деформації руйнування поширюється при постійних критичних умовах біля вершини тріщини, і будь-яка різниця в поведінці країв несуттєва для визначення умов руйнування зразка в цілому [59]. Як наслідок, поверхня руйнування буде прямою з дуже малою часткою косоного зламу по краях зразка (рис. 1.7). Таким чином, центральна частина зразка деформується в умовах, близьких до плоскої деформації [64]. Як наслідок, навколо вершини тріщини спостерігається високе стиснення деформації, що призводить до розвитку тривісного напруженого стану [65].

Такий розподіл напружено-деформованого стану посприяє зародженню руйнування, контрольованого, напругами, або деформаціями [66, 67]. Як наслідок, градієнт деформацій безпосередньо перед вершиною тріщини досить високий, пластична зона менше, і тріщина розвивається шляхом пластичного розтягування [67].

Пластична деформація, необхідна для росту тріщини, моделюється двома скупченнями дислокацій протилежних знаків, розташованих під кутом  $45^\circ$  до осі розтягнення. Подальший розвиток тріщини вимагає утворення двох інших скупчень ідентичної довжини, що може бути досягнуто тільки при більш високій прикладеній напрузі.

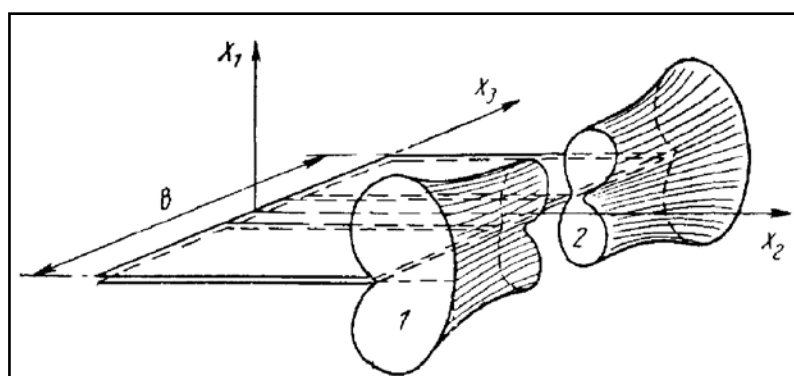


Рис. 1.7. Фізична модель руйнування в області В (див. рис. 1.4) [59]: на краях пластини напружений стан близький до плоского, в центрі – напружений стан приблизно відповідає плоскій деформації

### 1.7. Основні висновки по розділу

На основі проведеного літературного аналізу можна зробити висновок, що

товсті листи мають широкий спектр застосування. Вони можуть утворювати як перерізи несних елементів конструкцій так і щільно-міцні оболонки, що застосовуються для зберігання, перевантаження, транспортування та переробки рідких, газоподібних і сипучих речовин. Стосовно будівництва, товстолистовий металопрокат, в основному, застосовується при виробництві зварних конструкцій каркасів будівель і споруд. При цьому слід зазначити, що діюча на теперішній час нормативна документація передбачає при проектуванні зварних будівельних металевих конструкціях застосування металопрокату однакової товщини по перерізу елементів конструкцій. Однак, аналіз розподілу зовнішнього навантаження по перерізу конструкцій показує, що у деяких випадках слід застосувати при виробництві конструкцій листи різної товщини. Тому робота, спрямована на підвищення механічних властивостей і розширення областей застосування прокату з низьковуглецевих мікролегованих сталей вітчизняного виробництва на основі встановлення взаємозалежностей між структурою та кінетикою розповсюдження тріщини при динамічних механічних руйнуваннях є актуальною.

Таким чином, метою роботи є стабілізація фізичної нелінійності для зварних будівельних металевих конструкцій на основі встановлення взаємозв'язку між товщиною металопрокату та загальними металофізичними принципами розповсюдження та концентрації пластичної деформації.

Для досягнення поставленої мети в роботі було поставлено наступні задачі:

1. Дослідити взаємозв'язок між товщиною металопрокату, розмірами та відсотковим співвідношенням структурних складових: провести комплекс металографічних досліджень; виконати кількісний аналіз відсоткового співвідношення структурних складових в залежності від товщини листа.

2. Дослідити взаємозв'язок між товщиною металопрокату і комплексом міцнісних і пластичних властивостей низьковуглецевої мікролегованої сталі: провести кількісний аналіз розподілу відповідних характеристик в залежності від товщини листа; отримано відповідні математичні моделі.



3. Дослідити взаємозв'язок між товщиною металопрокату та ударною в'язкістю низьковуглецевої мікролегованої сталі: провести кількісний аналіз розподілу ударної в'язкості в залежності від товщини листа; дослідити зміни загальних характеристик зламів; отримати відповідні фізичні та математичні моделі; на підставі отриманих результатів побудувати загальну модель.

## РОЗДІЛ. 2

### МАТЕРІАЛ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1. Обґрунтування вибору матеріалу для дослідження. Методика аналізу хімічного складу та комплексу механічних властивостей.

У якості матеріалу для дослідження було обрано низьковуглецеву мікролеговану сталь 10Г2ФБ в товщина: 16, 20, 30, 40, 50, 70, 100 мм. Відповідний для кожної товщини хімічний склад (усереднений) наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Хімічний склад сталі 10Г2ФБ досліджуваних сталей

Товщина, мм	Елемент, %									
	C	Mn	Si	S	Cr	Ni	Ti	Mo	V	Nb
16	0,15	1,29	0,25	0,004	0,02	0,01	0,016	0,002	0,062	0,04
20	0,16	1,28	0,24	0,004	0,02	0,01	0,015	0,001	0,061	0,038
30	0,16	1,26	0,23	0,004	0,02	0,01	0,015	0,002	0,062	0,038
40	0,16	1,27	0,26	0,003	0,02	0,01	0,016	0,002	0,059	0,042
50	0,17	1,37	0,21	0,004	0,03	0,02	0,014	0,006	0,046	0,037
70	0,17	1,43	0,19	0,004	0,08	0,02	0,015	0,009	0,036	0,016
100	0,18	1,43	0,34	0,003	0,04	0,02	0,014	0,002	0,036	0,024

Хімічний склад зразка визначався за допомогою приладу SPECTROMAX, загальний вид якого приведений на рис 2.1. Аналіз виконувався згідно рекомендацій [68].

У цьому контрольованому приладі матеріал проби випаровується в результаті іскрового розряду [69]. Атоми, що звільняються при цьому, і іони збуджуються і випромінюють кванти випромінювання. Ці кванти направляються

в оптичну систему і вимірюється за допомогою техніки CCD (Електронний світлочутливий детектор, що перетворює світло в електричний заряд).

У пам'ять пристрою заздалегідь внесені калібровані дані. Вимірні значення порівнюються з цими даними, перераховуються, а потім виводяться на екран.

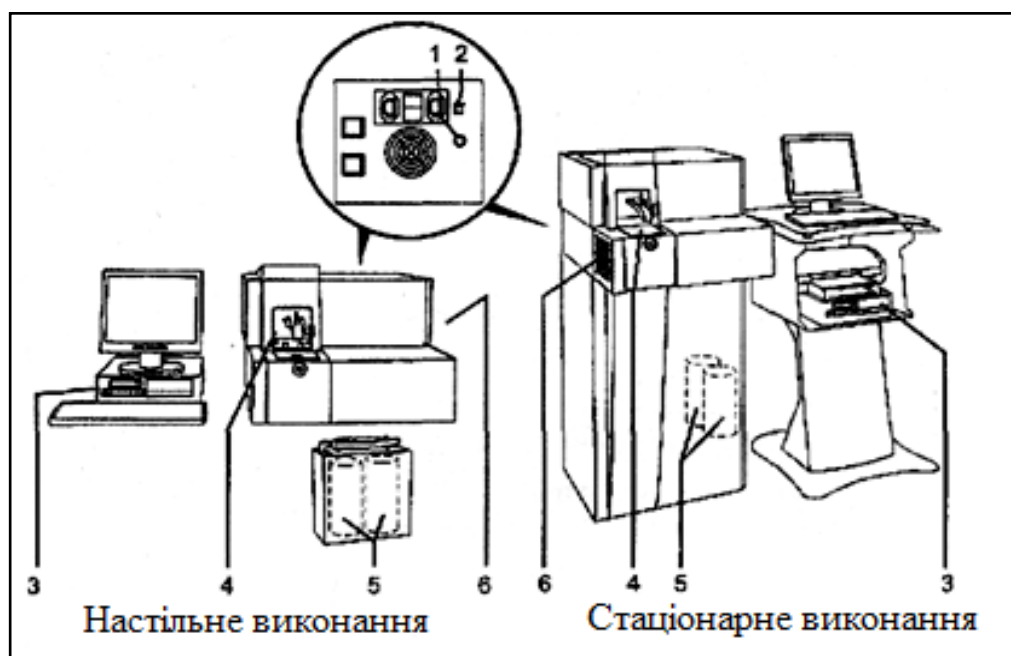


Рис. 2.1 Загальний вид приладу SPECTROMAX: 1 - з'єднання для аргону; 2 - з'єднання для передачі даних на комп'ютер; 3 - комп'ютер; 4 - іскровий стенд; 5 - фільтрувальні патрони; 6 - повітряний фільтр

Згідно поставленої мети, в роботі досліджувалися властивості, які б характеризували кінетику руйнування в об'ємі матеріалу, тобто спроможність матеріалу чинити опір зародженню та розповсюдженню тріщин. У якості експериментальних методик було застосовано: статичні механічні випробування (випробування на розтяг) і динамічні механічні випробування (випробування на ударний вигін).

**Випробування на розтяг** [70]. Є найбільш розповсюдженим видом випробувань матеріалів, тому що при їх проведенні найбільш яскраво виявляються характеристики міцності і пластичності матеріалів. При статичних

випробуваннях на розтяг визначали основні механічні характеристики матеріалів: границю плинності фізичну  $\sigma_m$ ; границю міцності або тимчасовий опір розриву  $\sigma_s$ ; відносне подовження після розриву  $\delta$ ; і відносне звуження  $\psi$  після розриву.

**Динамічні випробування** [71]. Найбільш поширеним різновидом динамічних випробувань є випробування на ударну в'язкість або динамічний вигин зразків з надрізом, які виконуються на маятникових копрах при нормальній, підвищеній і зниженій температурах. Наявність надрізу й підвищена швидкість деформування дають змогу перевести метал в крихкий стан і виявити його схильність до крихкого руйнування, тобто ті якості металу, які неможливо виявити при статичних випробуваннях. Випробування на маятниковому копрі ґрунтуються на принципі вимірювання енергії, яка витрачена на руйнування зразка.

## **2.2. Дослідження морфології структурних складових.**

Дослідження морфології структурних складових та поверхонь зламів здійснювали послідовно:

1-й етап: дослідження зразків при малих збільшеннях (металографічний аналіз);

2-й етап: дослідження зразків при середніх та порівняно високих збільшеннях (растрова електрона мікроскопія);

3-й етап: дослідження поверхонь руйнування (растрова електрона мікроскопія).

Для комплексу металографічних досліджень використовували спеціально підготовлені зразки - шліфи. Підготовку шліфів проводили згідно рекомендацій [72] за наступною методикою:

- відбір зразків – зразки відбиралися перпендикулярно напрямку прокатки;
- механічне потоншення з використанням абразивних матеріалів різної дисперсності;

- механічне полірування з використанням алмазних паст різної дисперсності;
- остаточне полірування на колі, обтягнутому фетром;
- електролітичне полірування (хімічний склад електроліту та режим полірування обирався згідно даних [73] і приведені в таблиці 2.2);
- хімічне травлення виконувалась згідно методики, викладеної у роботі [74].

Таблиця 2.2

## Хімічний склад електроліту та режими полірування зразків

Склад електроліту	Режими полірування			
	напруга на ванні, В	щільність струму, А/см <sup>2</sup>	температура, °С	час поліровки, хв.
25 г хромового ангідрида 125 см <sup>3</sup> оцтової кислоти 5 см <sup>3</sup> води	17...18	0,1	16...18	3

Після кожної з зазначених операцій зразки промивалися у спирті. Після механічного полірування алмазними пастами зразки промивалися у високооктановому бензині, а потім у дистильованій воді. Зразок після механічного шліфування й електролітичного полірування мав гладку дзеркальну поверхню вільну від подряпин.

Дослідження, аналіз і фотографування металографічних шліфів робили на металографічному мікроскопі «Неофот-2» та автоматичному аналізаторі структури «Эпиквант» при світлопольному прямому освітленні.

Кількісний аналіз відсоткового співвідношення структурних складових здійснювався згідно рекомендацій [75]. При виконанні кількісних металографічних досліджень використовували терміни та визначення згідно вимог [76].

Для досліджень морфології структурних складових (мікро та тонкої структури) використовувалась растрова електрона мікроскопія.

У растровій електронній мікроскопії зображення об'єкта формується послідовно по точкам і є результатом взаємодії електронного пучка (зонда) з поверхнею зразка. Кожна точка послідовно опромінюється сфокусованим електронним пучком, котрий переміщується по поверхні, що досліджується. При взаємодії електронів зонда з речовиною у відповідь виникає випромінювання різноманітної фізичної природи (відбиті і вторинні електрони, Оже-електрони, рентгенівське випромінювання і т.д.), котрі використовуються для синхронної побудови зображення на екрані монітора [77]. В даній роботі, при виконанні досліджень, для отримання інформації про структуру поверхні (зображення), використовувалися вторинні електрони.

Вторинними електронами зазвичай називають електрони, які генеруються зразком при бомбардуванні його первинним електронним пучком [77]. Вони мають безперервний енергетичний спектр від 0 до енергії електронів пучка. Такі електрони мають енергію істотно менш ніж 50eV. Наслідком низької енергії вторинних електронів є їх мала глибина виходу. Для того щоб залишити поверхню мішені, електрон повинен подолати енергетичний бар'єр, рівний роботі виходу, яка складає зазвичай декілька електрон-вольт. Тому ймовірність виходу вторинних електронів різко знижується із збільшенням глибини. Генерація вторинних електронів відбувається у всій області взаємодії електронів пучка зі зразком, проте залишити поверхню зразка можуть лише електрони, що виникли в тонкому приповерхневому шарі. Слід підкреслити, що вторинні електрони утворюються не тільки безпосередньо під дією первинних електронів пучка, але і за рахунок взаємодії відбитих з більш глибоких шарів електронів [77].

Аналіз кінетики механізму, що призвів до руйнування матеріалу проводили фрактографічно, тобто, по зовнішньому вигляду поверхні зламу згідно рекомендацій [78]. Поверхні зламів досліджували наступним чином:

- 1) шляхом дослідження мікрошліфа, який є перпендикулярним до поверхні зламу, з метою встановлення взаємозв'язку між характером зламу та структурою металу (використовуються металографічні мікроскопи);
- 2) шляхом безпосереднього вивчення поверхні зламу (використовувався растровий електронний мікроскоп).

Дослідження, аналіз і фотографування зразків при середніх та великих збільшеннях здійснювали за допомогою електронного мікроскопа скануючого типу PEM-106И.

### **2.3. Статистичний аналіз масивів експериментальних даних.**

Основною задачею статистичної обробки масивів експериментальних даних у розрізі застосування до вирішення прикладних задач сучасного матеріалознавства є виявлення причинних в'язків між незалежними і залежними змінними, тобто отримання кількісного взаємозв'язку, який надає змогу описати фізичний сенс досліджуваних процесів у вигляді статистичних математичних моделей [79]. Згідно рекомендацій, які наведено в літературних джерелах, (дивись наприклад роботу [80]) методику застосування математичного апарату статистичної обробки масивів експериментальних даних можливо узагальнити у вигляді наступного алгоритму:

1. Формування структурного плану статистичного аналізу – визначення сукупності параметрів процесу, що представляють предмет статистичного досліджування (визначення, які з параметрів будуть розглядатися як функції відгуку, які – у якості незалежних змінних [81]).
2. Попередня статистична обробка даних – аналіз та відсівання грубих похибок («випадів») в масивах даних, який відбувається шляхом перевірки відповідності масивів параметрам нормального закону розподілу. Методики перевірки відповідності нормальному закону викладена в роботах [82, 83]. У якості параметрів закону нормального розподілу, в даній роботі застосовувалися основні статистичні показники [84], а саме: середнє (математичне очікування); довірчий інтервал для середнього; медіана;

стандартне відхилення (середньоквадратичне відхилення); дисперсія; мінімум і максимум; розмах; асиметрія; ексцес.

3. Визначення типу і сили зв'язку між параметрами процесу - дослідження взаємозв'язку між двома і більше випадковими величинами (значеннями змінних, які характеризують параметри процесу) [85]. Для отримання відповідних результатів щодо взаємозв'язку використовується математичний апарат кореляційного або коваріаційного аналізу [86], суть якого полягає в отриманні відповідних коефіцієнтів кореляції, аналіз яких дозволяє попередньо інтерпретувати напрямок зв'язку (знак «-» перед коефіцієнтом - зв'язок зворотній; «+» - прямий) і силу зв'язку (чисельне значення коефіцієнту кореляції:  $< 0,3$  - зв'язок слабкий; від  $0,31$  до  $0,5$  - помірний; від  $0,51$  до  $0,7$  - значний; від  $0,71$  до  $0,9$  - тісний; від  $0,91$  і вище - лінійний) [87].
4. Отримання кількісного зв'язку (математичних рівнянь) - вибір програмного забезпечення, необхідного для отримання та візуалізації результатів статистичного аналізу масивів експериментальних даних [88].
5. Інтерпретація отриманих результатів статистичної обробки - перевірка фізичного сенсу отриманих залежностей (чи задовольняють отримані результати загальноприйнятим фізичним теоріям та експериментальним результатам) [89].

#### **2.4. Математичне моделювання досліджуваних процесів**

На підставі проведеного статистичного аналізу масивів експериментальних даних було побудовано фізико-математичні моделі процесів, які досліджуються. Загальні принципи побудови фізико-математичних моделей технічних процесів наведено в роботах [90-92]. В дисертаційній роботі для отримання математичних моделей досліджуваних процесів було застосовано математичний апарат одномірного регресійного аналізу, який включає в себе отримання рівняння регресії за умови виконання наступних припущень [93]:

- вхідний параметр вимірювався з малою помилкою;



- результати спостережень над параметрами моделі задовольняють закону нормального розподілу випадкових величин;
- приналежність експериментальних даних до однієї і тієї ж генеральної сукупності (однорідність вибірових дисперсій).

Безпосередньо використання однофакторного регресійного аналізу містить [94]: отримання рівняння регресії методом найменших квадратів; статистичну оцінку отриманих результатів (перевірку значимості всіх коефіцієнтів і встановлені адекватності рівнянь); перевірку адекватності отриманої моделі (у більшості випадків використовується квазі-ньютонівський метод залишків [95]).

Комплекс обчислювальних операцій здійснювали на ПЕОМ з застосуванням пакету прикладних програм для статистичної обробки Statistica [96] та Microsoft Excel [97].

### РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТОВЩИНИ ПРОКАТУ НА СТРУКТУРУ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ МІКРОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ 10Г2ФБ В РІЗНИХ ТОВЩИНАХ

#### 3.1. Дослідження структури сталі 10Г2ФБ в різних товщинах металопрокату.

Металографічний аналіз зразків сталі 10Г2ФБ (рис. 3.1...3.3) показав, що для всіх досліджуваних товщин структура сталі являє собою ферито-перлітний конгломерат. Феритні зерна мають поліедричну форму. Перліт являє собою колонії квазіевтектоїду.

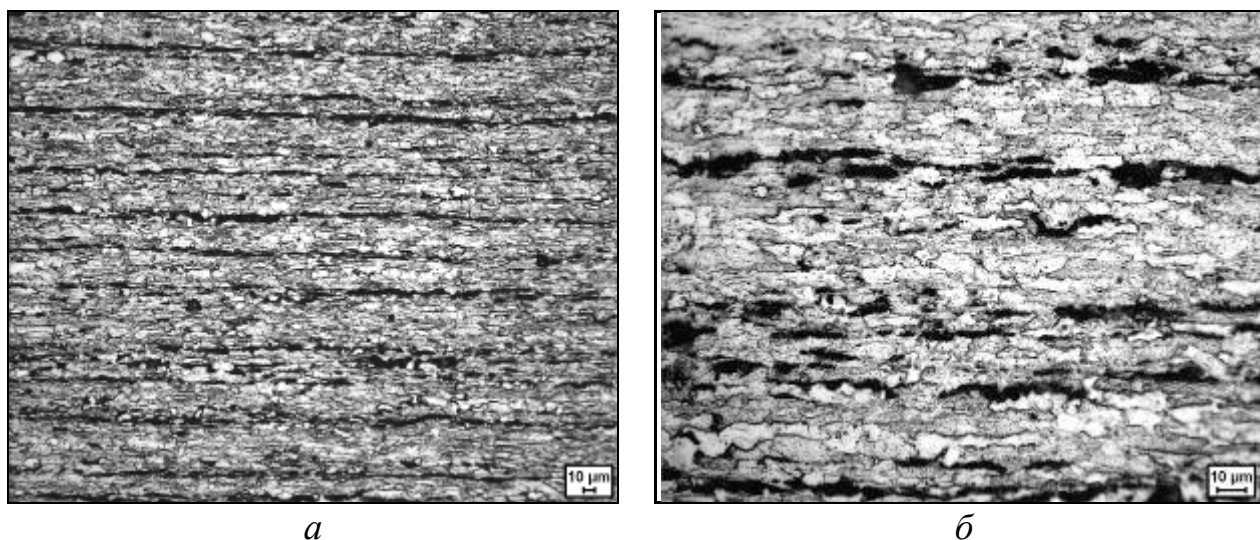
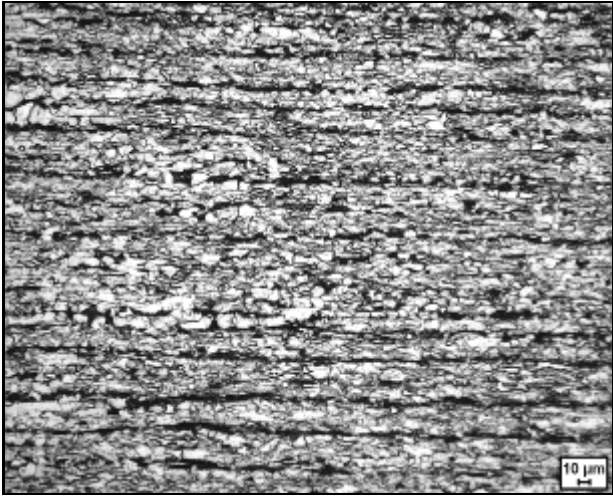
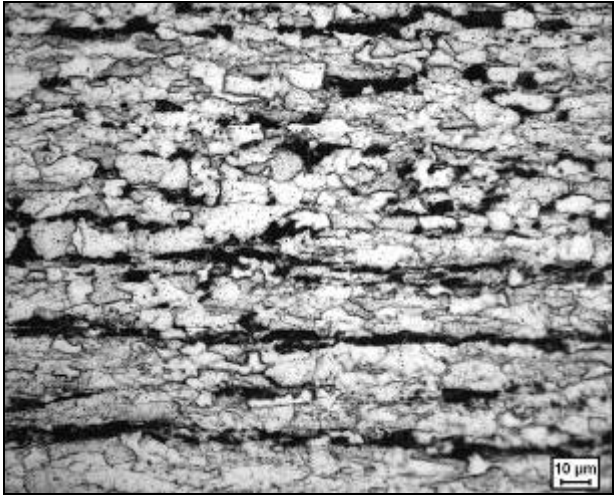


Рис. 3.1. Структура сталі 10Г2ФБ товщиною 16 мм

Проведений комплекс металографічних досліджень показав, що на поверхні зразка в результаті термічної обробки формується ферито-перлітна структура. При цьому зерна фериту мають правильну поліедричну форму. Утворенням евтектоїдної структури управляють два фактори: швидкість зародження й швидкість росту. Зародки звичайно з'являються на границях аустенітних зерен, де виконується умова мінімальної енергії поверхні розділу, а потім ростуть в аустенітну фазу.



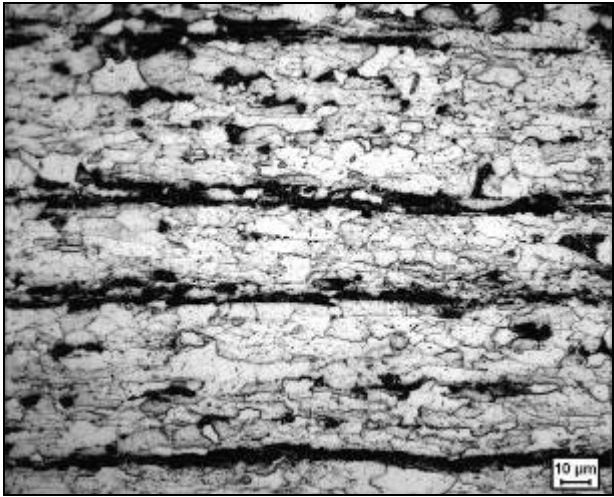
*a*



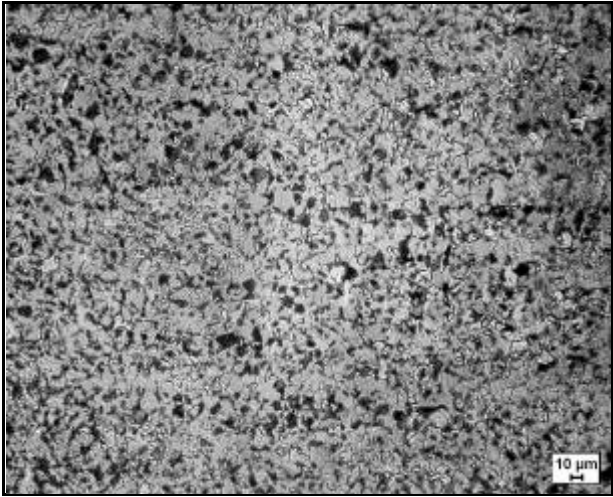
*б*



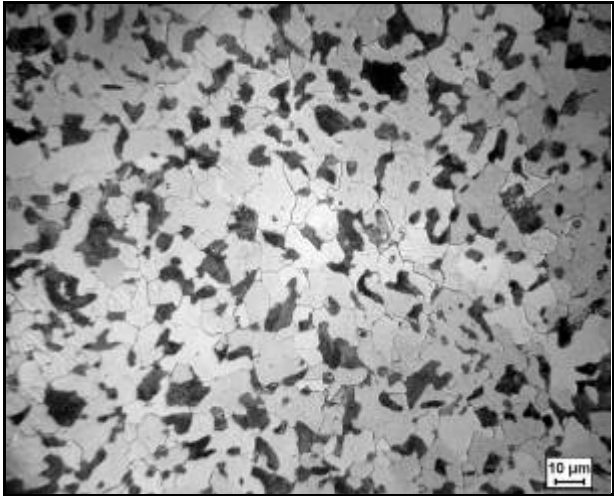
*в*



*г*



*д*



*е*

Рис. 3.2. Структура сталі 10Г2ФБ: *a, б* – товщина 20 мм; *в, г* – товщина 30 мм; *д, е* – товщина 40 мм

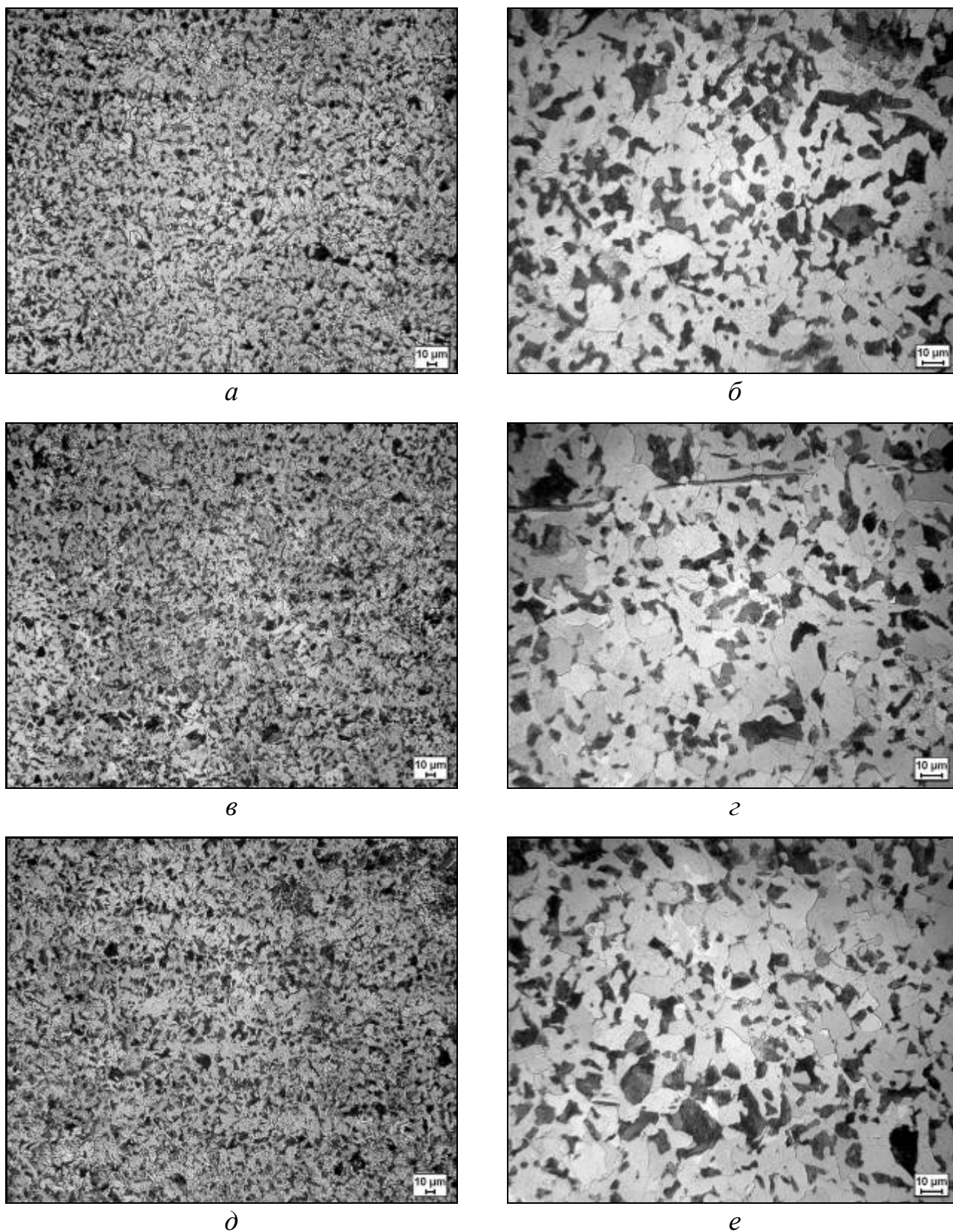


Рис. 3.3. Структура сталі 10Г2ФБ: *a, б* – товщина 50 мм; *в, в* – товщина 70 мм; *д, е* – товщина 100 мм

У безпосередній близькості перших цементитних пластин аустеніт збіднюється вуглецем і в підсумку утвориться суміжний шар фериту. Зміст вуглецю в сусідніх областях аустеніту при цьому збільшується й з'являється новий цементитний зародок [98, 99].

### **3.2. Кількісне дослідження відсоткового вмісту структурних складових з урахуванням товщини металопрокату.**

Кількісний аналіз відсоткового вмісту структурних складових узагальнено та наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Відсотковий вміст структурних складових

<b>Вміст структурних складових, %</b>	<b>Товщина металопрокату, мм</b>						
	16	20	30	40	50	70	100
<b>Ферит</b>	80	85	75	80	80	75	75
<b>Перліт</b>	20	15	25	20	20	25	25

Встановлення взаємозв'язку між відсотковим вмістом структурних складових та товщиною металопрокату здійснювали з застосуванням математичного апарату одномірного регресійного аналізу.

Послідовність регресійного аналізу починали з візуальної оцінки положення даних за допомогою відповідних графіків (див. рис. 3.4 *а, б*). Графічна інтерпретація отриманих моделей наведена на рис. 3.5 *а, б*.

Для аналізу отриманих регресійних моделей в якості методу оцінювання використовується квазі-ньютонівський метод залишків (різниць між вихідними значеннями залежної змінної і передвіщеними за допомогою моделі). Застосування даної концепції дозволило оцінити ступінь адекватності отриманої

моделі графічним методом (графік розподілу залишків на нормальній ймовірнісній папері рис. 3.5 в, з).

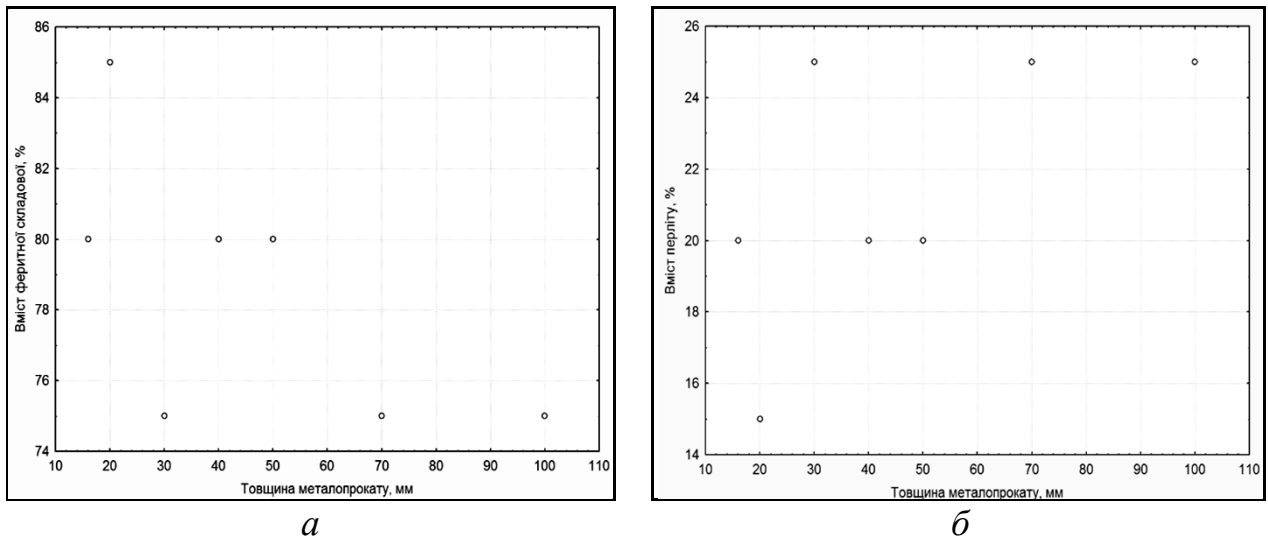


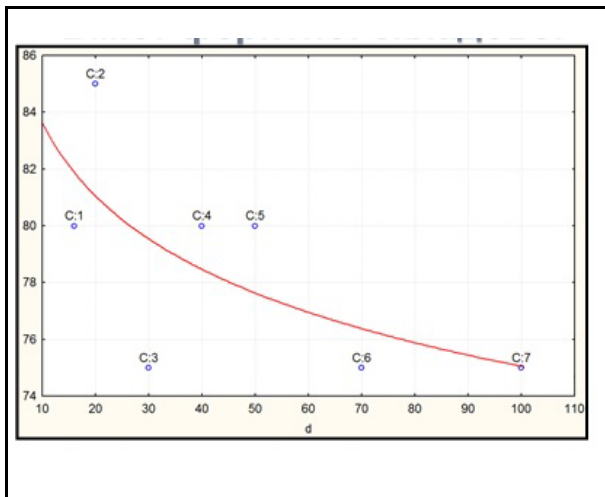
Рис. 3.4. Залежність відсоткового вмісту структурних складових від товщини металопрокату: *а* – відсотковий вміст феритної складової; *б* – відсотковий вміст перлітної складової

В якості аналітичних моделей було отримано логарифмічні рівняння регресії. Загальний вид рівнянь та відповідні коефіцієнти наведені у табл 3.2.

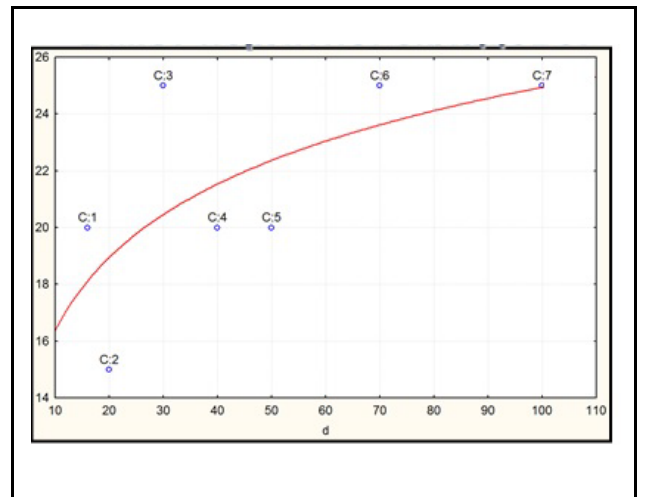
Таблиця 3.2

Загальні характеристики отриманих моделей

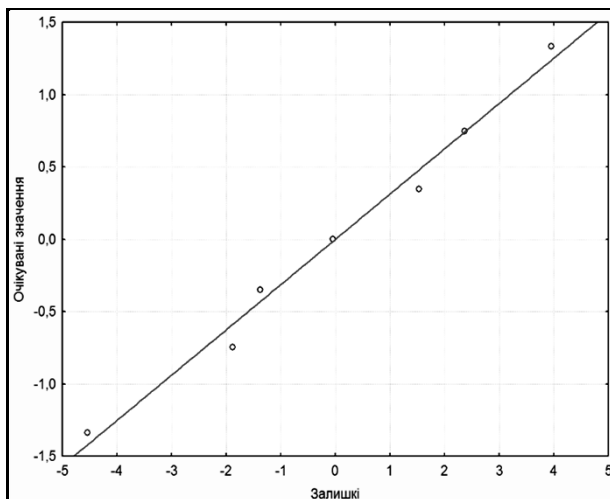
Параметр	Рівняння	Коефіцієнти рівняння	
		$b_0$	$b_1$
Вміст феритної складової	$\%Fer = b_0 - b_1 \times \log_{10}(x)$	92,2152	8,5822
Вміст перлітної складової	$\%Pear = b_0 + b_1 \times \log_{10}(x)$	7,7848	8,5822



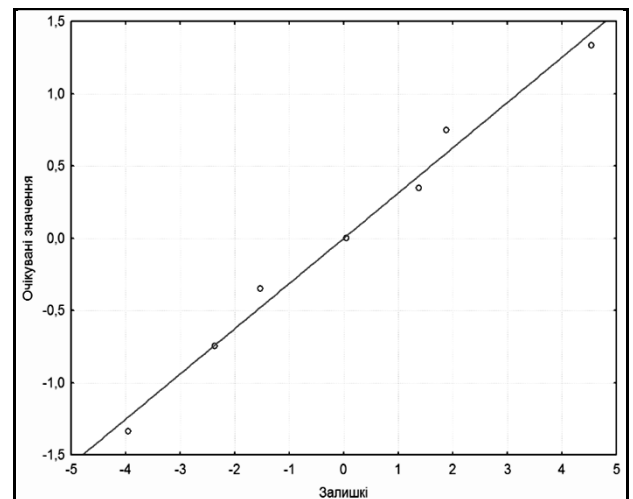
а



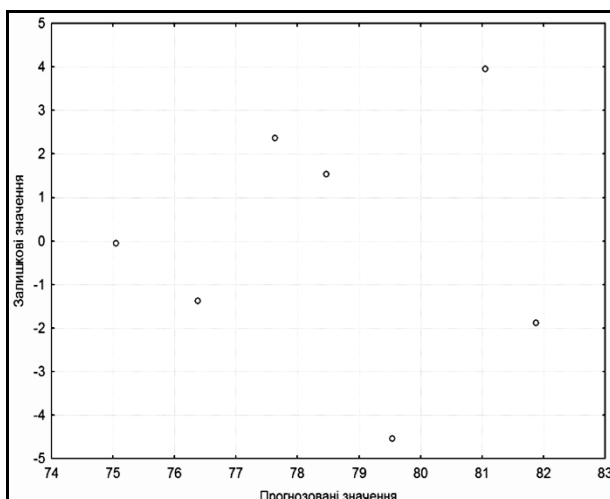
б



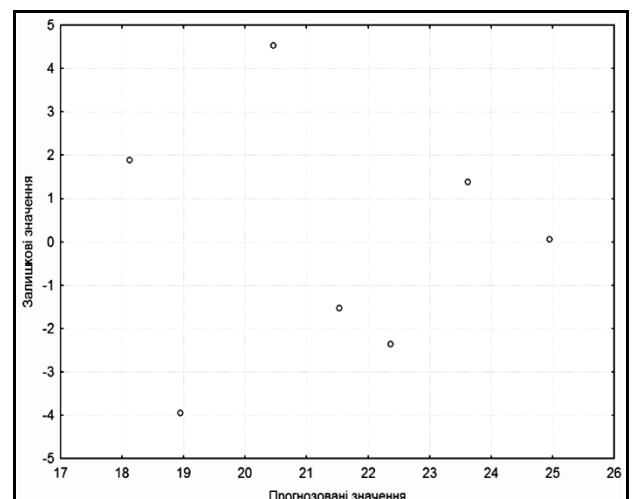
в



г



д



е

Рис. 3.5. Отримані регресійні моделі: а, б – загальний вигляд моделей; в, г – графіки розподілу залишків на нормальному ймовірнісному папері; д, е – розподіл залишків; а, в, д – феритна складова; б, г, е – перлітна складова



Аналіз графіків (рис. 3.5 *в, з*) показує, що, для обох моделей, залишки з достатнім ступенем точності лягають на пряму, яка відповідає нормальному закону розподілу. Тому гіпотеза про нормальний розподіл помилок приймається. На рис. 3.5 *д, е* наведені графіки розподілу залишків. З графіків випливає, що, для обох моделей, залишки хаотично розкидані на площині і в їх поведінці немає закономірностей. Немає підстави говорити, що залишки корельовано між собою. Отже, можна зробити висновок, що регресійні моделі досить адекватно описують досліджувані залежності.

### 3.3. Дослідження тонкої структури сталі 10Г2ФБ в різних товщинах

Результати дослідження тонкої структури сталі 10Г2ФБ наведено на рис. 3.6...3.8.

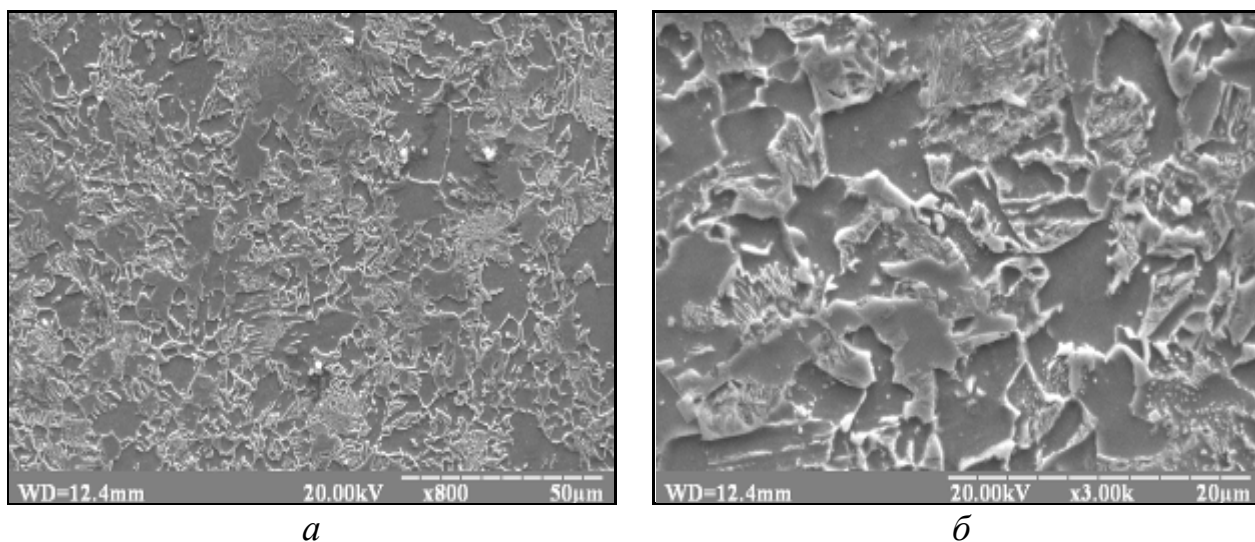


Рис. 3.6. Тонка структура сталі 10Г2ФБ товщиною 16 мм

Дослідження тонкої структури показали, що для всіх товщин металопрокату зерна феритної фази мають правильну поліедричну форму. Зародки нових фаз з'являються найчастіше на поверхні зерен аустеніту й включень. Надалі відбувається поступовий ріст цементиту й фериту у вигляді приблизно рівноосних утворень. У деякий момент на границях зерен виникають зародки цементиту, які ростуть у вигляді пластин у середину зерна.



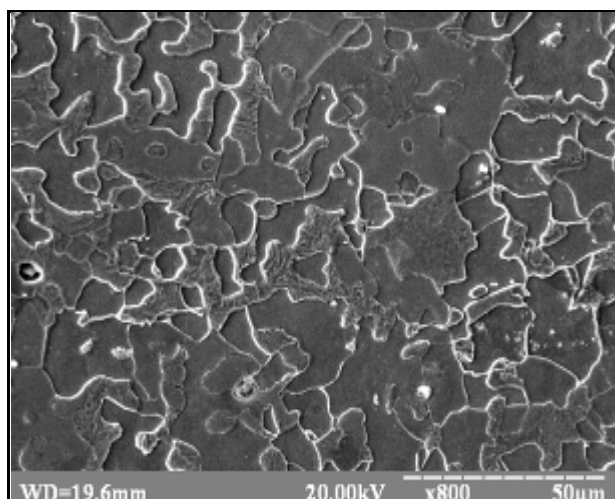
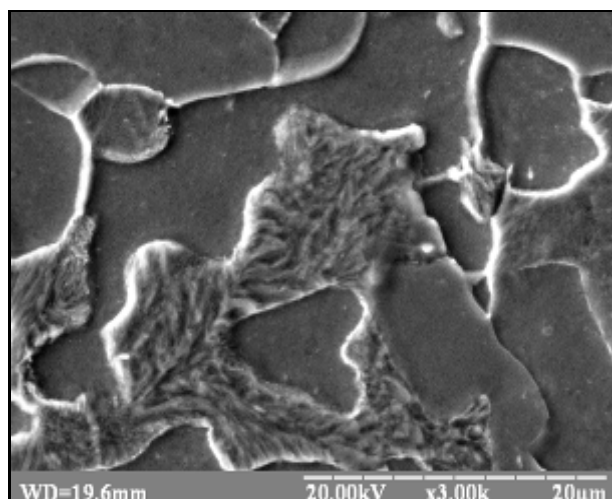
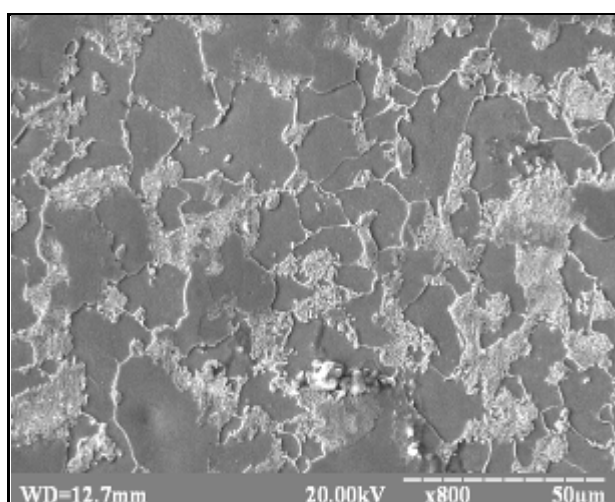
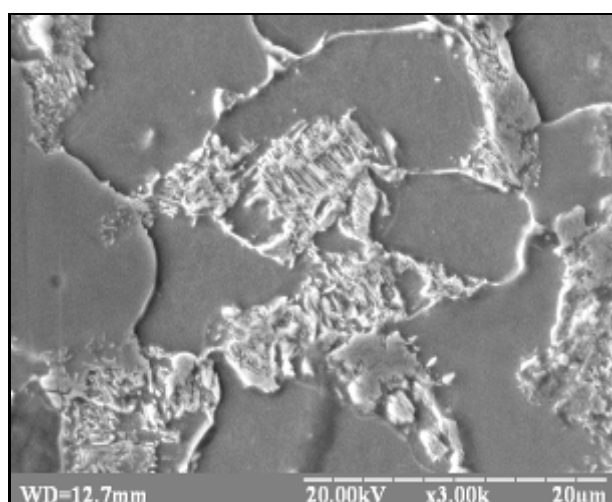
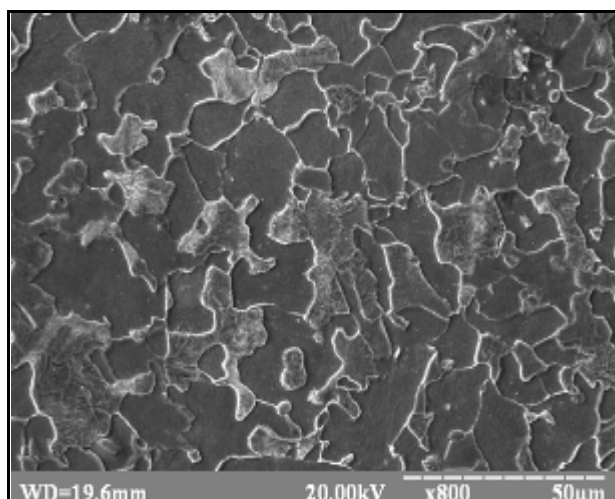
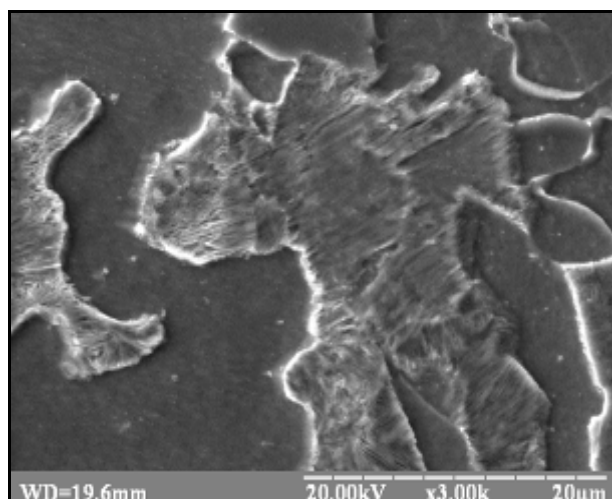
*a**б**в**г**д**е*

Рис. 3.7. Тонка структура сталі 10Г2ФБ: *a, б* – товщина 20 мм;  
*в, г* – товщина 30 мм; *д, е* – товщина 40 мм

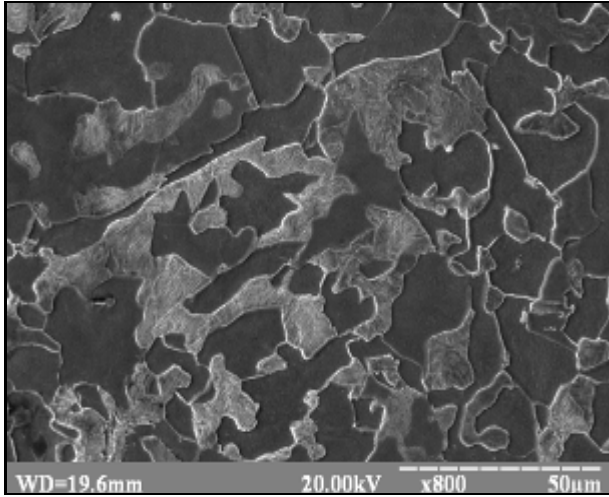
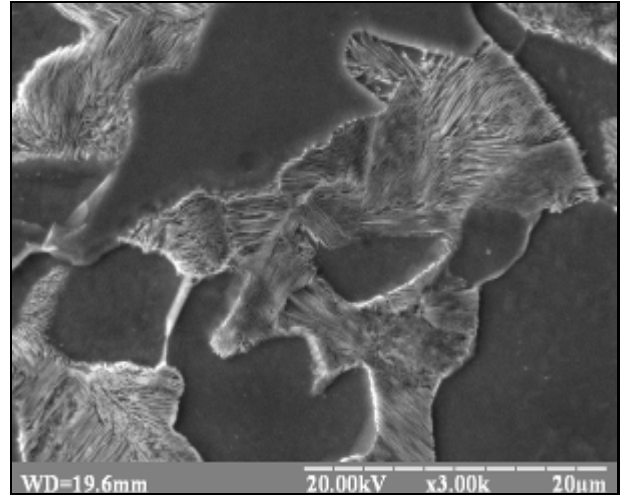
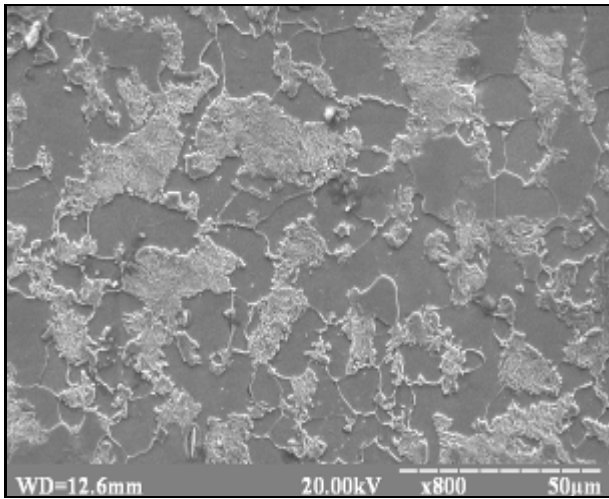
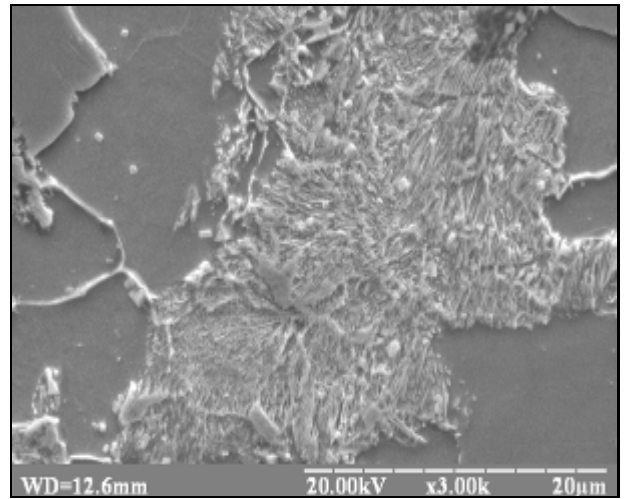
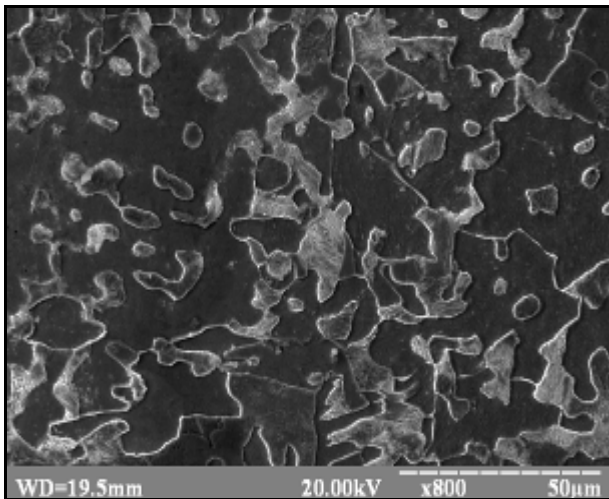
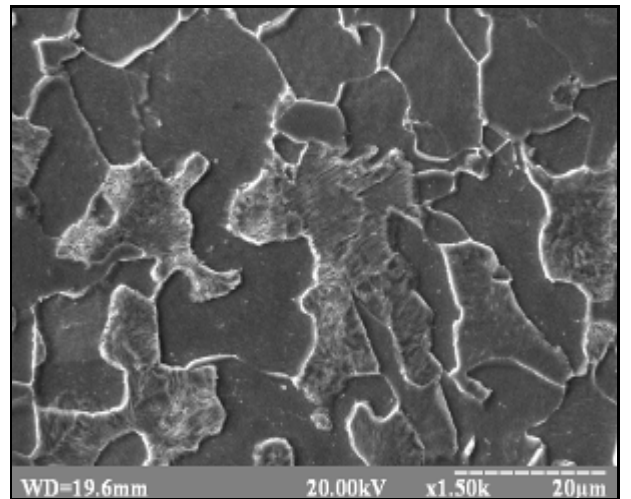
*a**б**в**г**д**е*

Рис. 3.8. Структура сталі 10Г2ФБ: *a, б* – товщина 50 мм; *в, г* – товщина 70 мм; *д, е* – товщина 100 мм

На поверхні кожної пластини цементиту, як на підкладці, кристалізується ферит, це сприяє збагаченню цієї ділянки аустеніту залізом. Ріст пластини фериту викликає збагачення вуглецем сусідньої ділянки аустеніту, що полегшує появу нового зародка цементиту.

Таким чином, позмінна перекристалізація цементиту й фериту поширюється уздовж границь. З'являються колонії перліту, ріст яких триває до їхнього взаємного зіткнення (див. наприклад рис. 3.7 з).

Зі збільшенням товщини металопродукату спостерігається зміна форми цементитного каркасу перлітних колоній з сфероподібного на віялоподібний (класифікація форми цементитного каркасу здійснена на підставі роботи [100]). Цей факт пояснюється відповідними змінами умов охолодження з підвищенням товщини.

Результати кількісної оцінки розмірів структурних складових (феритних зерен та колоній перліту) узагальнено та наведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

## Усереднений розмір структурних складових

Розмір структурних складових, мкм	Товщина металопродукату, мм						
	16	20	30	40	50	70	100
<b>Ферит</b>	7	8	9	13	14	15	18
<b>Перліт</b>	7	10	11	13	14	16	17

Сумісний аналіз даних рис. 3.1...3.8 та таблиць 3.1...3.3 показує, що зі збільшенням товщини металопродукату спостерігається зростання розмірів структурних складових, при цьому їх відсоткове співвідношення майже не змінюється (зміни знаходяться у межах допустимої похибки). З огляду на масштабний фактор, можна сказати, що швидкість охолодження зі збільшенням

товщини металопрокату змінюється. Про це свідчить, наприклад, збільшення розмірів колоній перліту, при зменшенні загальної кількості колоній.

Збільшення розмірів структурних складових пояснюється зменшенням швидкості охолодження зі збільшенням товщини металопрокату. Внаслідок цього коефіцієнт дифузії збільшується, а концентраційний градієнт зменшується. В результаті, відбувається збільшення відстані між пластинками в колонії. Крім того, збільшення коефіцієнту дифузії призводить до підвищеної рухливості атомів вуглецю, що сприяє більш ефективному росту структурних складових колонії в напрямку градієнту концентрації. Таким чином, зріст колоній перліту відбувається згідно схемам, наведеним на рис. 3.9 [99, 101].

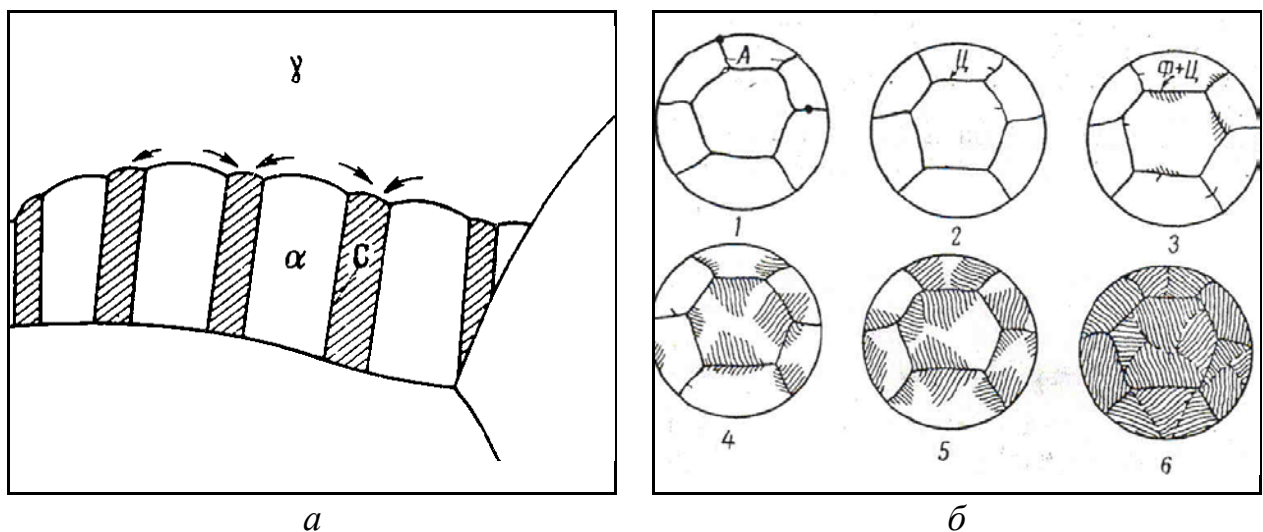


Рис. 3.9. Схема формування перлітних колоній (квазіевтектоїду) низьковуглецевих мікролегованих сталей (за даними робіт [99, 101])

### 3.4. Кількісний аналіз розмірів структурних складових в залежності від товщини металопрокату

Встановлення взаємозв'язку між геометричними розмірами структурних складових та товщиною металопрокату здійснювали на підставі даних, отриманих у п. 3.3.

Графічні залежності розмірів зерен фериту та колоній перліту наведено на рис. 3.10. Відповідні моделі будувалися за допомогою одномірного регресійного аналізу. Графічна інтерпретація отриманих моделей наведена на рис. 3.11 *а, б*.

Для аналізу отриманих регресійних моделей в якості методу оцінювання використовується квазіньютонівський метод залишків (різниць між вихідними значеннями залежної змінної і передвіщеними за допомогою моделі). Застосування даної концепції дозволило оцінити ступінь адекватності отриманої моделі графічним методом (рис. 3.11 *в, г*).

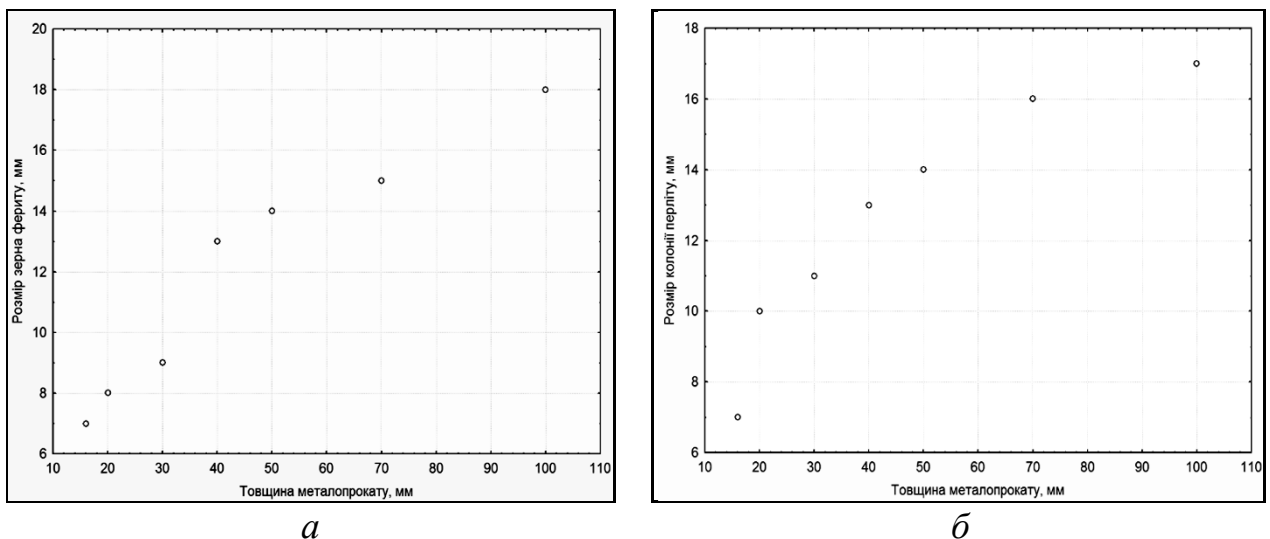
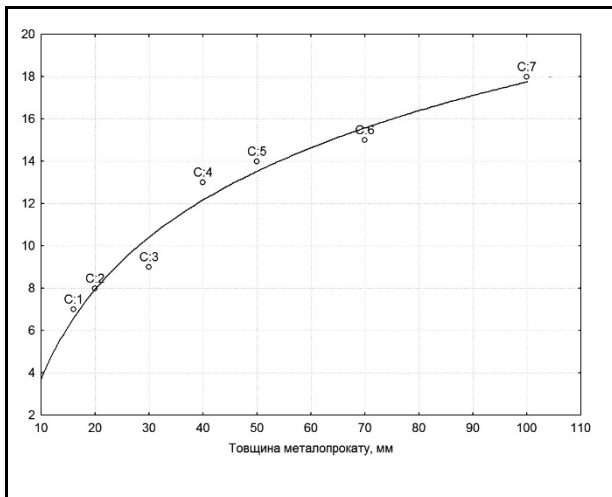
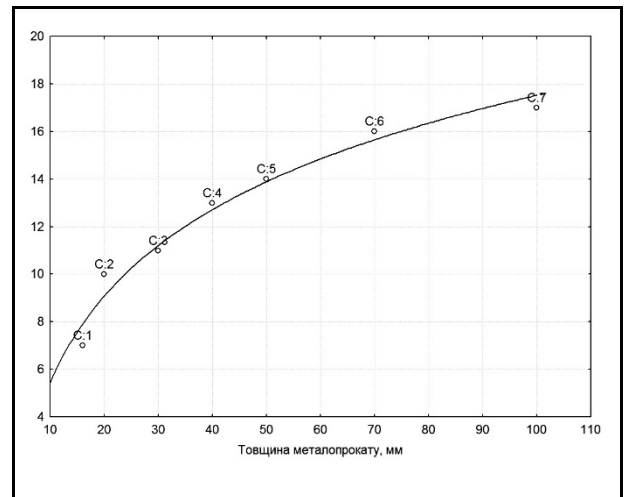


Рис. 3.10. Залежність розмірів структурних складових від товщини металопрокату: *а* – розмір зерен фериту; *б* – розмір колоній перліту.

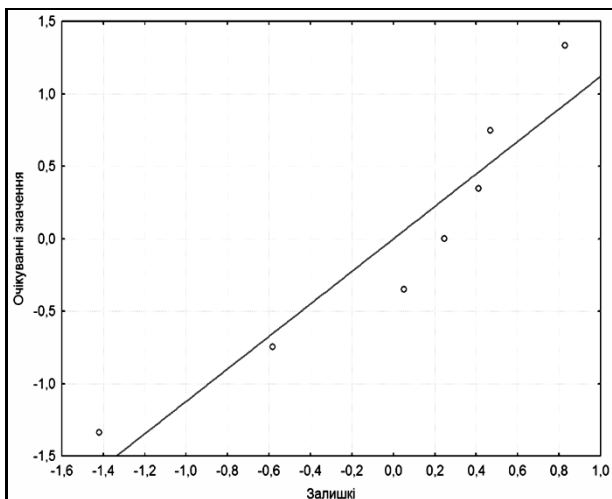
Аналіз графіків (рис. 3.11 *в, г*) показує, що, для обох моделей, залишки з достатнім ступенем точності лягають на пряму, яка відповідає нормальному закону розподілу. Тому гіпотеза про нормальний розподіл помилок приймається. На рис. 3.11 *д, е* наведені графіки розподілу залишків. З графіків випливає, що, для обох моделей, залишки хаотично розкидані на площині і в їх поведінці немає закономірностей. Немає підстави говорити, що залишки корельовані між собою. Отже, можна зробити висновок, що регресійні моделі досить адекватно описує досліджувані залежності.



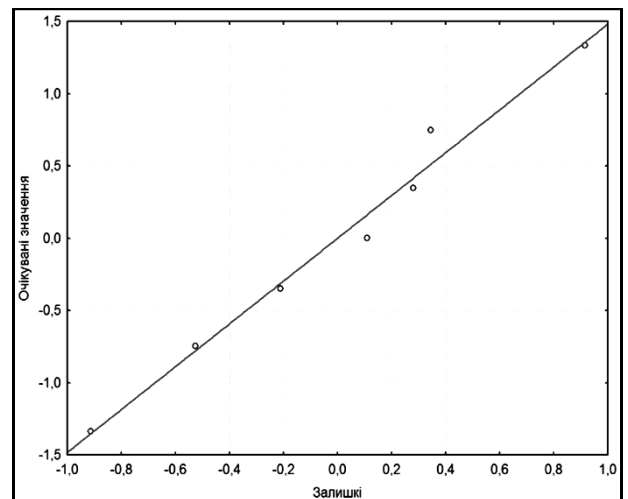
а



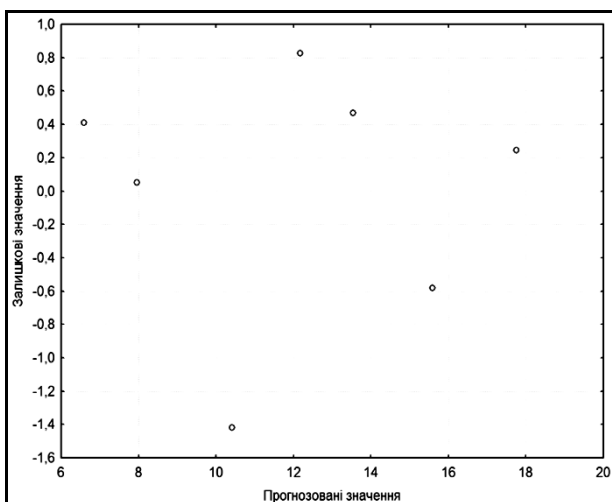
б



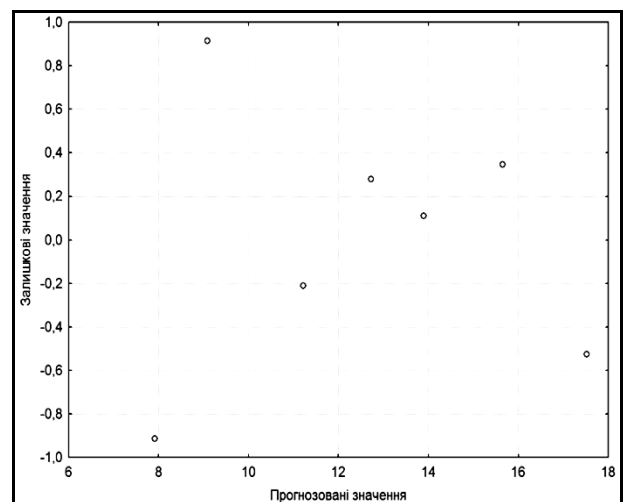
в



г



д



е

Рис. 3.11. Отримані регресійні моделі: а, б – загальний вигляд моделей; в, г – графіки розподілу залишків на нормальному ймовірнісному папері; д, е – розподіл залишків; а, в, д – розмір зерен фериту; б, г, е – розмір колоній перліту.

В якості аналітичних моделей було отримано логарифмічні рівняння регресії. Загальний вид рівнянь та відповідні коефіцієнти наведені у табл 3.4.

Таблиця 3.4

## Загальні характеристики отриманих моделей

Параметр	Рівняння	Коефіцієнти рівняння	
		$b_0$	$b_1$
Розмір зерен фериту	$D_{fer} = -b_0 + b_1 \times \log_{10}(x)$	10,3035	14,0264
Розмір колоній перліту	$D_{pear} = -b_0 + b_1 \times \log_{10}(x)$	6,6271	10,0763

**3.5. Висновки.**

1. Мікроструктурний аналіз показав, що мікроструктурними складовими усіх досліджуваних систем є ферит та перліт. Сталь товщиною 16 мм має ферито-перлітну структуру у співвідношенні 70% - 30% відповідно. Зі збільшенням товщини збільшується відсотковий вміст феритної складової з одночасним зменшенням відсотку перліту. Для сталі товщиною 100 мм мікроструктура складається з 80 % ферита та 20 % перліта. Ферит формується у виді зерен поліедричної форми, а перлітні колонії розташовано у ліквацийних полосах.

2. На підставі отриманих кількісних даних щодо залежності відсоткового вмісту структурних складових від товщини металопрокату було побудовано відповідні регресійні моделі. Аналіз моделей показує, що аналізовані залежності мають нелінійний характер і описуються логарифмічними рівняннями типу  $Y = b_0 + b_1 \times \log_{10}(x)$ .

3. Дослідження тонкої структури показали, що зі збільшенням товщини металопрокату спостерігається зріст розмірів структурних складових, при цьому їх відсоткове співвідношення майже не змінюється (зміни знаходяться у межах допустимої похибки). З огляду на масштабний фактор, можна сказати, що швидкість охолодження зі збільшенням товщини металопрокату змінюється. Про це свідчить, наприклад, збільшення розмірів колоній перліту, при зменшенні загальної кількості колоній.

4. На підставі отриманих даних було побудовано математичні моделі взаємозв'язку між геометричними розмірами структурних складових та товщиною металопрокату. В якості аналітичних моделей було отримано логарифмічні рівняння регресії.



## РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАГАЛЬНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РУЙНУВАННЯ СТАЛІ 10Г2ФБ З УРАХУВАННЯМ ТОВЩИНИ МЕТАЛОПРОКАТУ

### 4.1. Фрактографічний аналіз поверхонь руйнування сталі 10Г2ФБ в різних товщинах

Результати проведеного комплексу фрактографічних досліджень наведено на рис. 4.1...4.4.

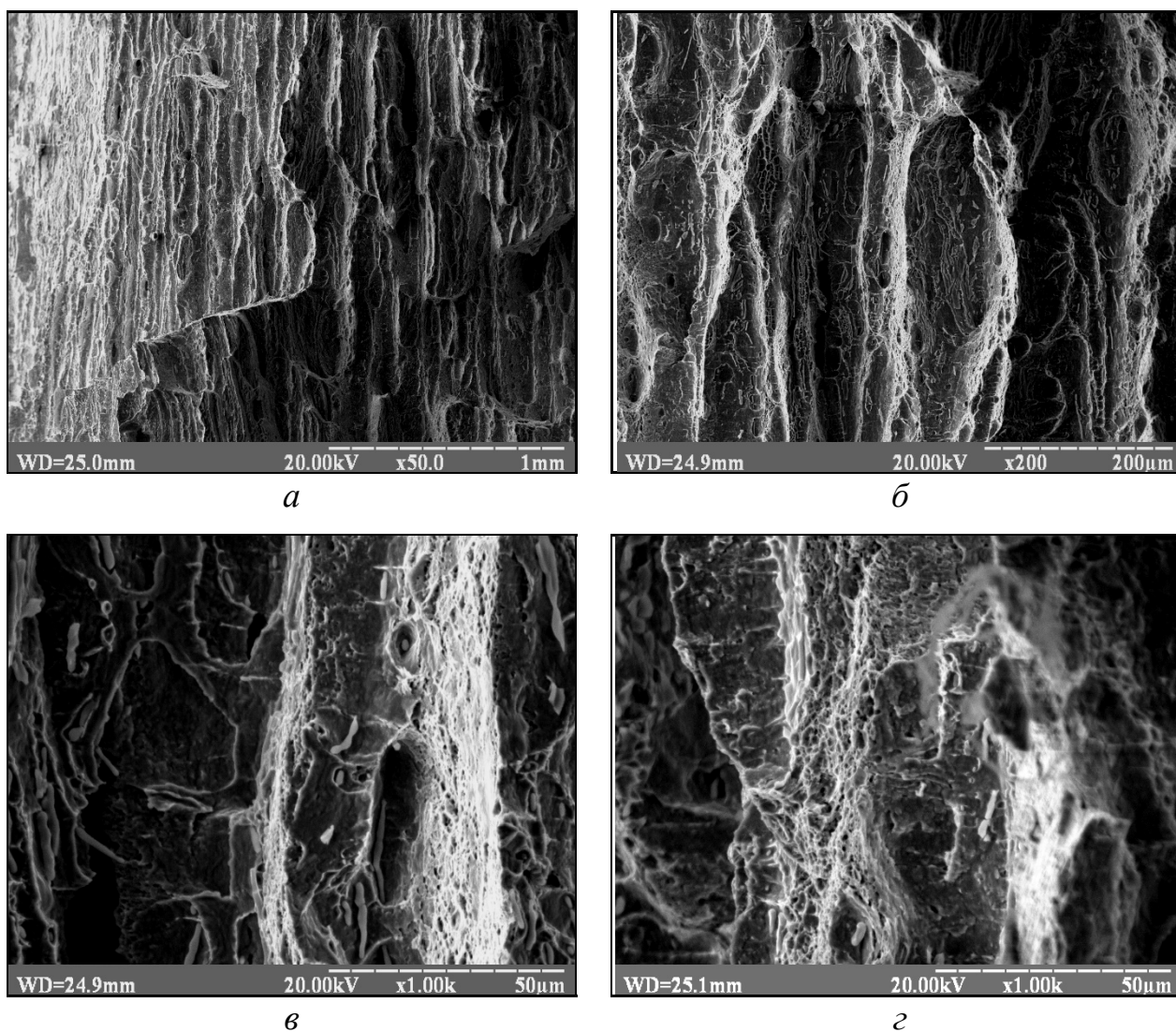


Рис. 4.1. Мікрофрактографічний аналіз сталі 10Г2ФБ товщиною 16 мм

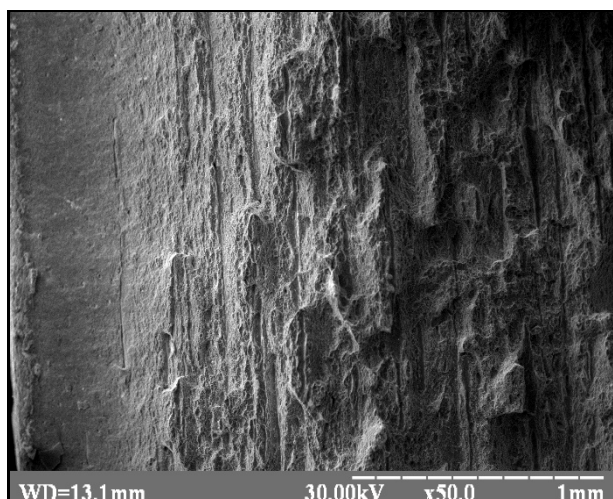
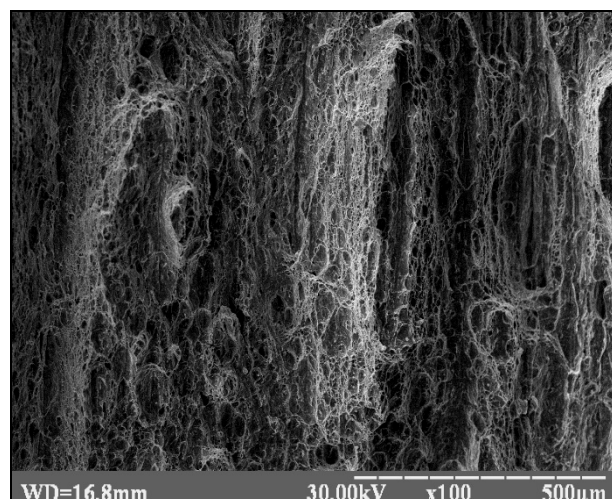
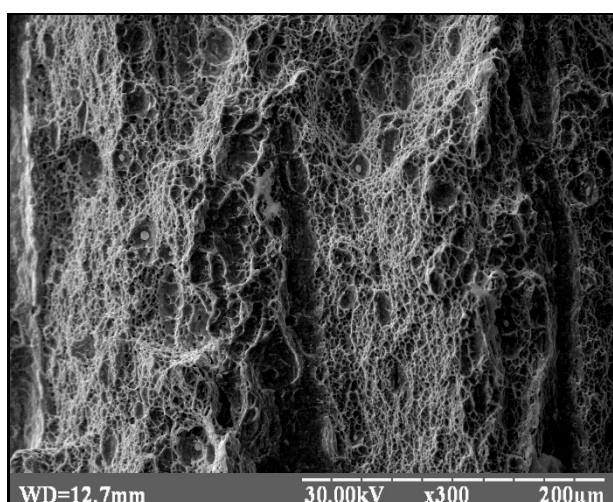
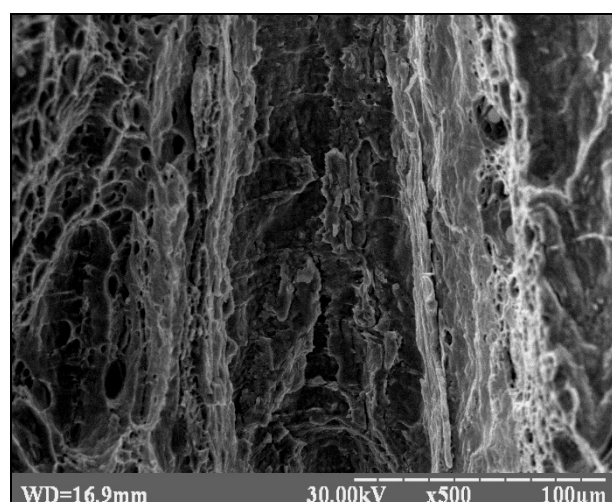
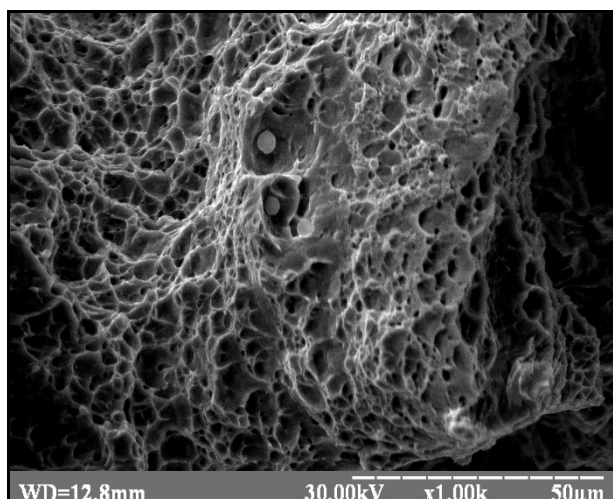
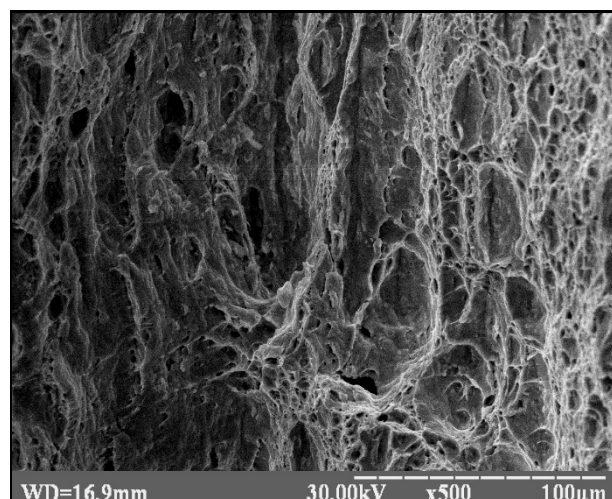
*a**z**б**д**в**е*

Рис. 4.2. Мікрофрактографічний аналіз сталі 10Г2ФБ: *a, б, в* – товщиною 20 мм;  
*z, д, е* – товщиною 30 мм

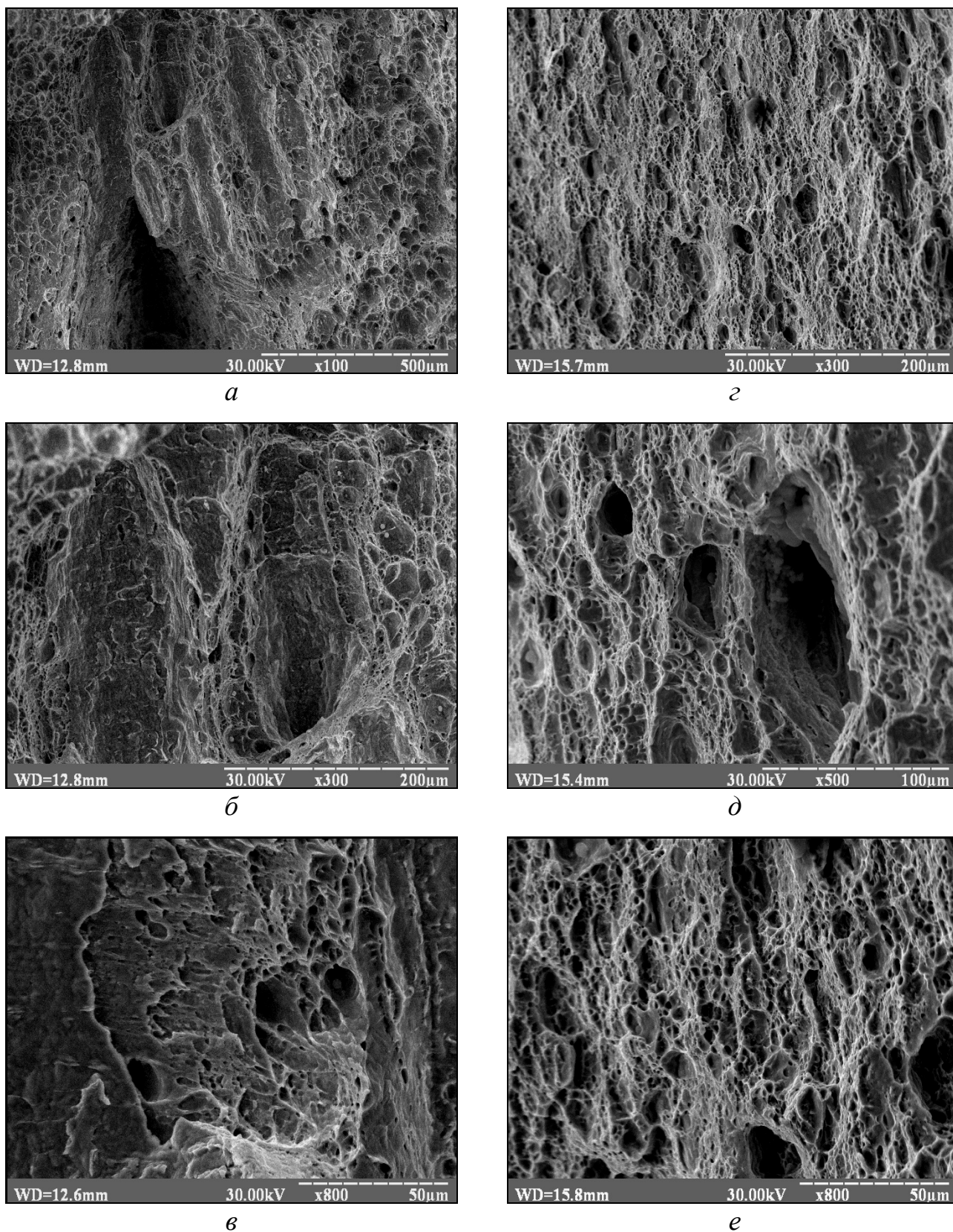


Рис. 4.3. Мікрофрактографічний аналіз сталі 10Г2ФБ: *а, б, в* – товщиною 40 мм;  
*г, д, е* – товщиною 50 мм



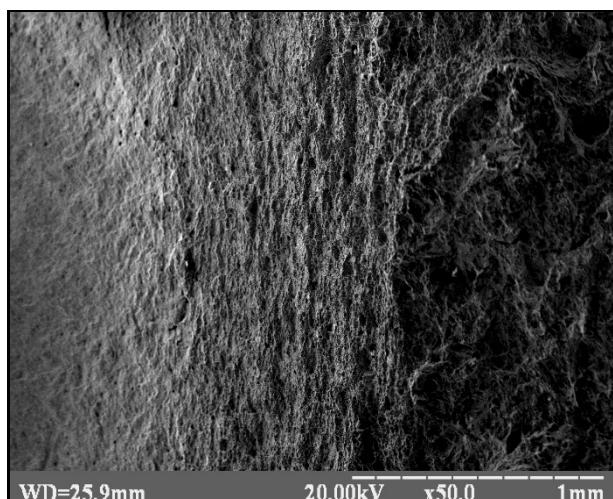
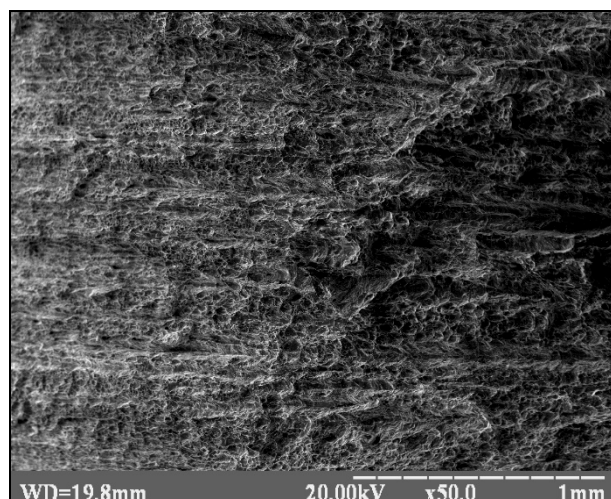
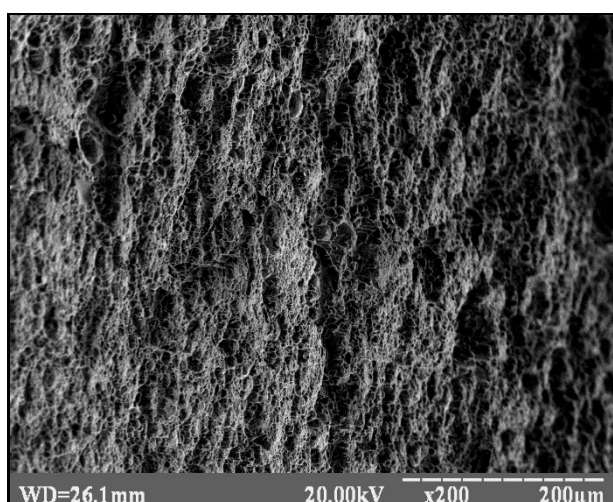
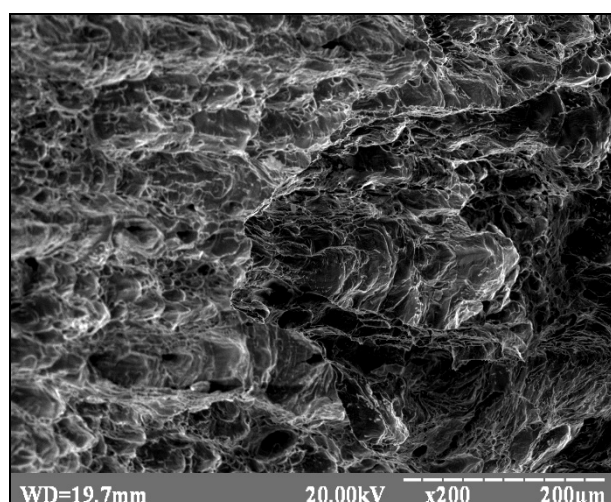
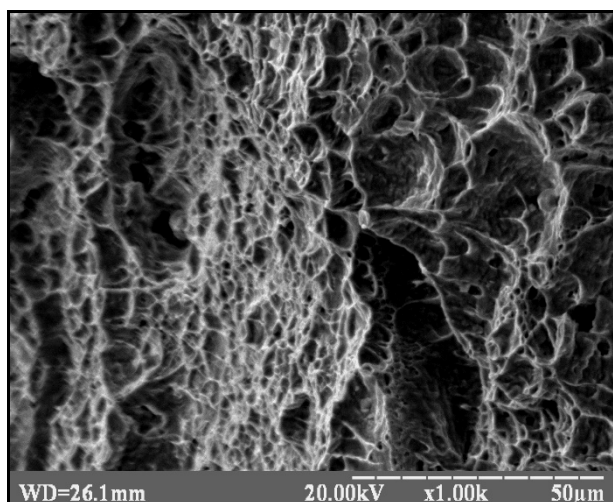
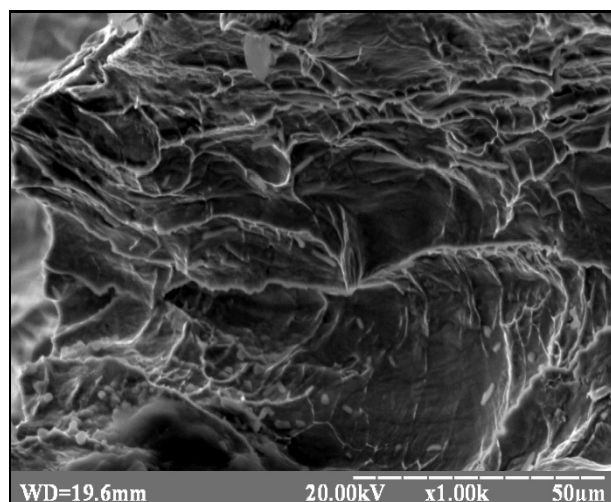
*a**z**б**д**в**е*

Рис. 4.4. Мікрофрактографічний аналіз сталі 10Г2ФБ: *a, б, в* – товщиною 70 мм;  
*z, д, е* – товщиною 100 мм

Аналіз отриманих даних показав, що для товщини 16 мм руйнування відбувається внаслідок косого зламу, поверхня має гладкі поверхні та ступені – ознаки руйнування за механізмом квазісколу. Згідно даних металографічного аналізу у структурі металопрокату даної товщини присутні ферит і перліт. Виходячі з цього, можливо припустити, що ознаки крихкого руйнування будуть мати перлітні колонії, тому що цементитна фаза в перліті є дисперсною й зміцнюючою. Квазівідрив на початковій стадії утворення фасетки виявляє ознаки переважно кристалічного відриву, тоді як у місцях злиття мікротріщин виявляються ознаки пластичного руйнування.

Мікрофрактографічні знімки товщин 20...50 мм кардинально відрізняються від знімків товщини 16 мм тим, що з'являються області локалізації пластичної деформації, які призводять до зросту в'язкої складової зламу. Разом з цим, на зламах також присутні елементи квазікрихкого внутризеренного руйнування. Підтвердження того, що дана структурна складова зруйнувалася шляхом квазіскола, є наявність трьох основних його ознак: язички, сходи, гребені.

На зламах товщин 70...100 мм присутні сліди значної пластичної деформації та велика кількість пор біля часток. Ці частки слугують осередками зародження руйнування, та стримують розповсюдження тріщин, роблячи руйнування в'язким. При цьому, переважним процесом є пластична деформація. Так, у процесі пластичної деформації неоднакова пружність і пластичність матриці часток другий фази приводить до утворенні на границях розділів між ними мікротріщин або вільних поверхонь. Відомо, що в процесі росту вільні поверхні мають тенденцію перетворюватися на округлі раковини. Усяка така раковина або порожнеча сама по собі є поверхнею зламу, спочатку повністю ізольованої від інших порожнин. Із прискоренням пластичного плину ці порожнечі продовжують розширюватися. Якщо порожнина перебуває по сусідству з іншою вільною поверхнею, то вона росте доти, поки матеріал між двома вільними поверхнями не утворює тонку перегородку, яка потім

розривається. Подібний процес і називають злиттям порожнин. Поверхні зламу, що утворилися при злитті порожнин, являють собою округлі западини.

Величина ямок визначається переважно двома наступними факторами:

1. Площею початкової внутрішньої поверхні.
2. Ступенем пластичної деформації перед злиттям порожнини з іншою вільною поверхнею.

Морфологічні ознаки поверхонь руйнування узагальнено згідно характеристик, що наведено у п. 1.6 даної роботи та наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

#### Морфологічні ознаки поверхонь руйнування

Товщина, мм	Морфологічні ознаки поверхонь руйнування	Тип руйнування (згідно п. 1.6)
16	<i>Незначна пластична деформація структурних складових; наявність сходинок відриву.</i>	Косий зріз, Тип А
20	<i>Пластична деформація нерівномірно розподіляється по структурним складовим; ділянки квазікрихкого руйнування.</i>	Пластичне деформація + косий зріз, Тип В
30		
40		
50		
70	<i>Значна пластична деформація структурних складових з появою полос Чернова-Людерса</i>	Пластичне розтягнення, Тип С
100		

#### 4.2. Кількісний аналіз впливу хімічного складу на кінетику зародження в'язкого руйнування

При зародженні руйнування частинки другої фази грають роль концентраторів напруг і перешкоджають руху дислокацій, таким чином впливаючи на характер руйнування матеріалу [102].

Кількісний аналіз поверхонь руйнування (рис. 4.1...4.4) показав, що формування пор відбувається на частках другої фази розмірами 28...32 мкм та 17...25 мкм. Саме такий розмір часток пояснюється наступними теоретичними

припущеннями. Великі частинки (розмір  $>30$  мкм) є дуже крихкими і не можуть пристосуватися до пластичних деформацій навколишньої кристалічної решітки. Тому при появі пластичної деформації, вони швидко руйнуються (вже при малих деформаціях). Як наслідок, руйнування породжується частками, розміри яких лежать в діапазоні 15...30 мкм. Оскільки ці частки не можуть деформуватися настільки легко, як і сама кристалічна решітка, при виникненні навколо них зони деформації вони втрачають зчеплення з кристалічною решіткою і стають місцями зародження руйнування [103].

Для визначення впливу розподілу хімічного складу на ударну в'язкість з урахуванням товщини металопрокату було проведено комплекс досліджень, який містив елементи попарного кореляційного аналізу [104]. Даний тип аналізу було застосовано з метою визначення наявності впливу кожного з елементів хімічного складу сталі на ударну в'язкість. Результати проведеного комплексу досліджень представлено у вигляді матриці кореляційного аналізу (див. рис. 4.5) та відповідної таблиці коефіцієнтів попарної кореляції (див. табл. 4.2).

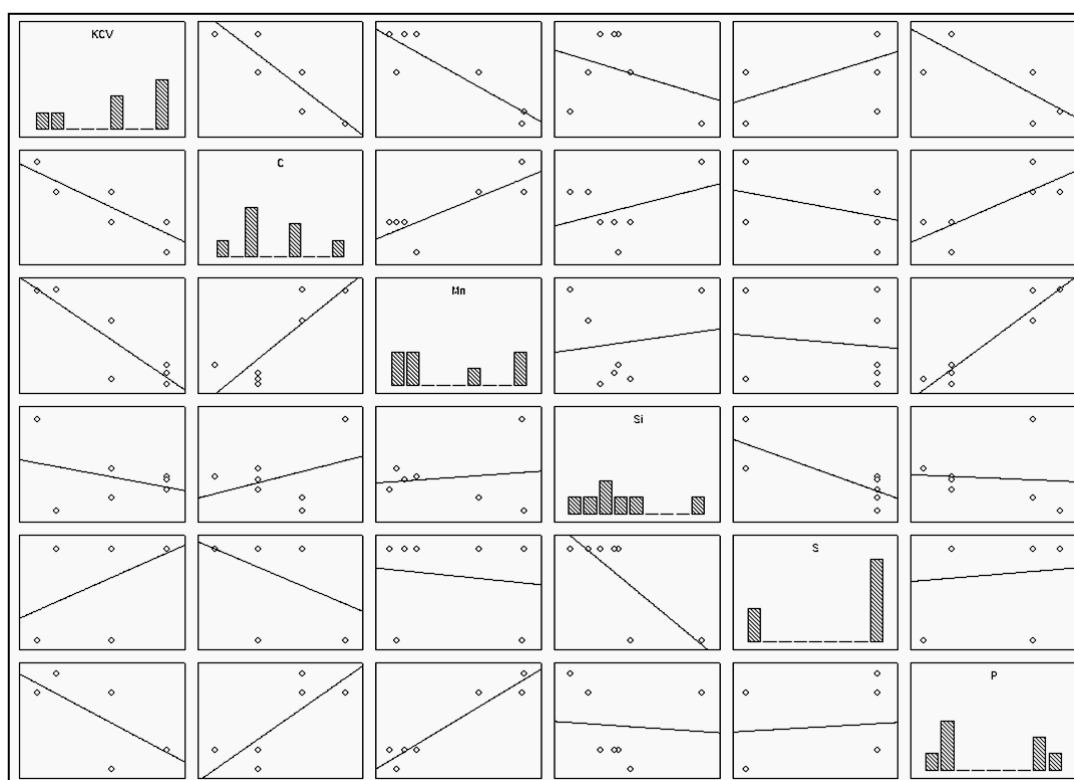


Рис. 4.5. Матриця кореляційного аналізу

## Коефіцієнти попарної кореляції

Параметри	Ударна в'язкість	C	Mn	Si	S	P
Ударна в'язкість	1,00	-	-	-	-	-
C	-	1,00	-	-	-	-
Mn	-	-	1,00		<b>2,24</b>	<b>0,96</b>
Si	-	-	-	1,00	-	-
S	-	-	<b>2,24</b>	-	1,00	-0,40
P	-	-	<b>0,96</b>	-	-0,40	1,00

Коефіцієнт попарної кореляції дозволяє оцінити сумісний вплив змінних на функцію відгуку (для даних табл. 4.2 функція відгуку – ударна в'язкість). Чим більше значення коефіцієнтів то відчутніший вплив відповідних факторів на функцію відгуку.

Сумісний аналіз даних рис. 4.5 та табл. 4.2 дозволив відокремити хімічні елементи який мають істотний вплив на ударну в'язкість: сульфідів і фосфідів. Таким чином, на підставі даних кількісного аналізу розмірів часток, які є місцями зародження пор при в'язкому руйнуванні та даних кореляційного аналізу, можна зробити припущення, що саме на частках сульфідів та/або фосфідів буде відбуватися зародження руйнування. З метою підтвердження даного припущення було виконано комплекс досліджень з застосуванням енергодисперсійного аналізу, результати яких наведено на рис. 4.6.

Проведений комплекс досліджень показав, що основними місцями зародження пор у структурі сталі 10Г2ФБ для всіх товщин металопрокату є поверхні розділу сульфід-матриця. Таким чином, можна дістати висновку, що з точки зору місця зародження, кінетика руйнування буде залежить від розподілу часток другої фази.



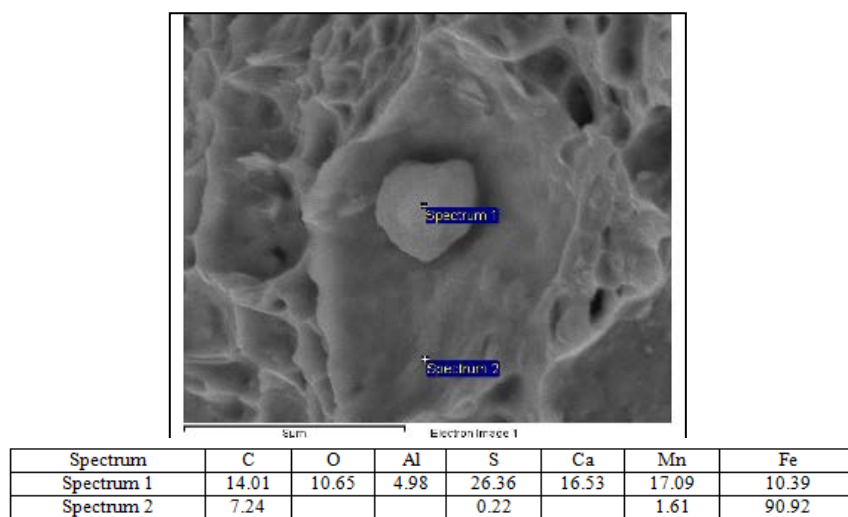
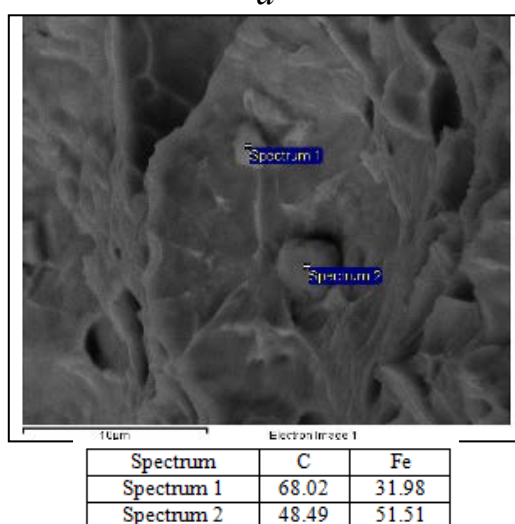
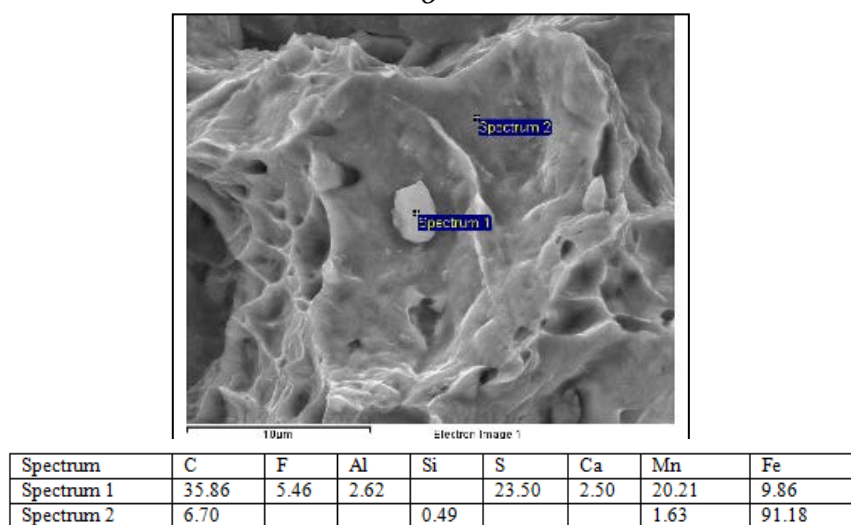
*a**б**в*

Рис. 4.6. Енергодисперсійний аналіз поверхонь руйнування сталі 10Г2ФБ: *a* – товщина 16 мм; *б* – товщина 40 мм; *в* – товщина 100 мм

### 4.3. Фізична модель зародження в'язкого руйнування

Локалізація напружень біля часток другої фази в сталі пов'язана з двома основними причинами [105]: різним термічним стисненням частки і матриці під час охолодження матеріалу і концентрацією прикладених напружень, що обумовлено відмінністю модулів пружності частки і матриці, а також формою і розміром часток.

Внаслідок різниці коефіцієнтів лінійного розширення частки і матриці навколо частки виникають внутрішні (структурні) напруги  $\sigma_t$ . Математично ці напруги, що з'являються в результаті термічного стиску при охолодженні, виражаються за допомогою рівняння (4.1):

$$\sigma_t = \phi \cdot (\alpha_M - \alpha_B) \cdot \Delta t \quad (4.1)$$

де  $\phi$  – функція модулів пружності частки і матриці, а так само розміру, форми і розподілу часток;  $\alpha_M$  – коефіцієнт теплового розширення матриці;  $\alpha_B$  – коефіцієнт теплового розширення частки;  $\Delta t$  – зміна температури.

Для більшості оксидних часток температурні коефіцієнти нижчі, ніж для матриці [106], тобто  $\alpha_B < \alpha_M$ , і виникає нормальна складова напруги. Отже, оксидні частки створюють напруги, що можуть призводити до значної зміни властивостей матриці навколо них та локальної пластичної деформації. Сульфіди мають більш високий температурний коефіцієнт порівняно з матрицею, що призводить до утворення пор на відповідній поверхні розділу. Легкість утворення цих пор грає важливу роль у в'язкому руйнуванні сталей з сульфідними включеннями. Ступінь впливу неметалевих включень різних типів на структурні напруги (отримано за даними роботи [107]) показана на рис 4.7. Частки, коефіцієнт термічного стиску яких більше, ніж у матриці утворюють пори; частки, коефіцієнт термічного стиску яких менше, ніж у матриці утворюють нормальну складову напруги.

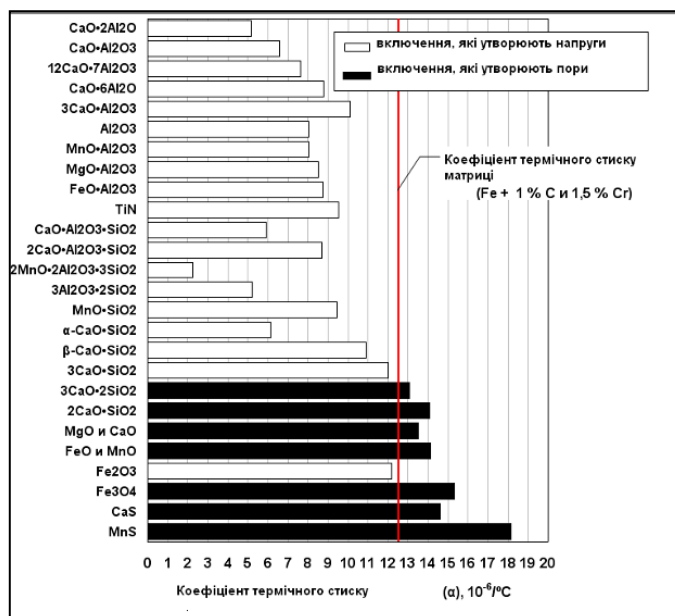


Рис. 4.7. Здатність включень різних типів у сталі підвищувати напруги і утворювати пори [106]

Отже, виникнення пор навколо частки у великій мірі залежить від сили зв'язку частки з матрицею металу. Для таких включень, як сульфіди марганцю в сталі, сили зв'язку занадто малі і пори можуть зароджуватися і зростати у напрямку прикладених розтягуючих напруг при малих показниках пластичної деформації. Проте, навіть якщо включення не зв'язані з матрицею хімічно, зародження пор зазвичай ускладнюється напругами, що з'являються внаслідок різниці стискання часток і матриці при охолодженні, в результаті чого відбувається захват частки матрицею. Якщо напруги, що виникають у включеннях, є розтягуючими, то частки можуть бути зруйнованими ще до розриву з поверхнею. Такі частки як карбіди і нітриди в сталях зв'язані з матрицею достатньо міцно і пори можуть виникати лише при високих ступенях локальних напружень.

При цьому, слід зазначити, що частки другої фази незалежно від механізму та розвитку пластичної деформації сприяють її локалізації шляхом накопичення дислокацій на міжфазних границях. Автори роботи [108] показали, що пори навколо часток зароджуються відповідно до моделі зародження та розповсюдження в'язкої тріщини, запропонованої Броеком. Згідно цієї моделі

пори виникають на границі розподілу «частка – матриця» завдяки створенню у часток дислокаційних скупчень, тобто навколо часток виникають дислокаційні петлі (див. рис. 4.8). Під дією зовнішніх сил ці петлі відштовхуються від часток. В той же час передня петля виштовхується до частки наступними дислокаціями під дією напруження зсуву. Якщо одна, чи більше петель будуть відштовхнені на границю, частка відділиться від матриці і утвориться пора [109].

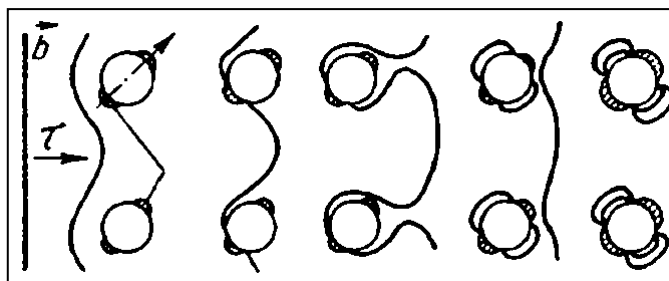


Рис. 4.8. Модель Броека накопичення дислокацій на поверхні розділу частка-матриця [109]

Разом с цим, аналіз результатів фактографічних досліджень, виконаних в роботі, показав, що модель Броека описує лише стадію знищення сил зв'язку частка-матриця, так яка вона не враховує присутність зсувної компоненти напруги, яка завжди має місце на поверхнях розділу. Наступні стадії зростання пори можливо представити сумісною дією двох дислокаційних механізмів, кожних з яких обумовлено дією власної компоненти напруги.

Під дією нормальної компоненти напруги відрив частки від матриці буди здійснюватися в напрямку вздовж дії напруги (рис. 4.9), під дією зсувної компоненти – під кутом (рис. 4.10). Саме за таких умов можливо зростання пор у двох напрямках (у площині) вздовж та поперек прикладеного навантаження.

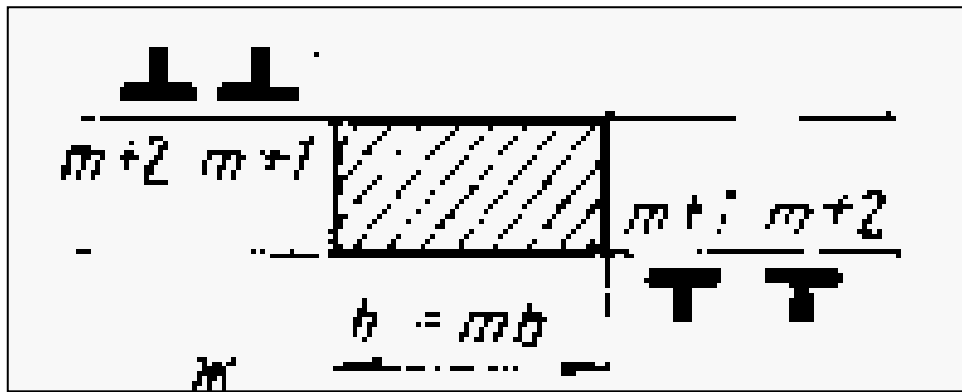


Рис. 4.9. Зародження та зріст пор вздовж здвигу [110]

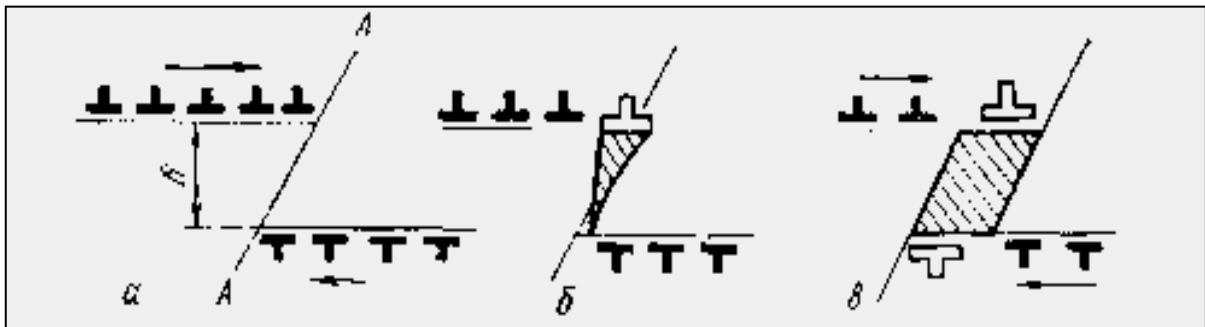


Рис. 4.10. Зародження пори під дією зсувної компоненти напруги [110]

#### 4.4. Фізична модель повільного зростання в'язкої тріщини

Критерії для початку злиття пор і в'язкого руйнування в значній мірі залежать від відстані між частинками. При цьому, слід зазначити, що зростання пор зазвичай відбувається в напрямку головної деформації і дуже чутливе до форми часток. Видовження пор призводить до зменшення відстані між ними в поперечному напрямку (див. рис. 4.11). Однією з моделей, яку побудовано на підставі даних концепцій є модель злиття мікропорожнин Томасона [111].

Згідно цієї моделі стадія повільного зросту пор відбувається внаслідок дії пластичної деформації. Згідно теоретичних уявлень, пластична деформація перед зростаючою мікротріщеною формує зону, яка призводить до морфологічних і фазових змін у структурі матеріалу, тобто сприяє

розповсюдженню руйнування. З метою аналізу розмірів цієї зони було виконано кількісні підрахунки розмірів цієї зони.

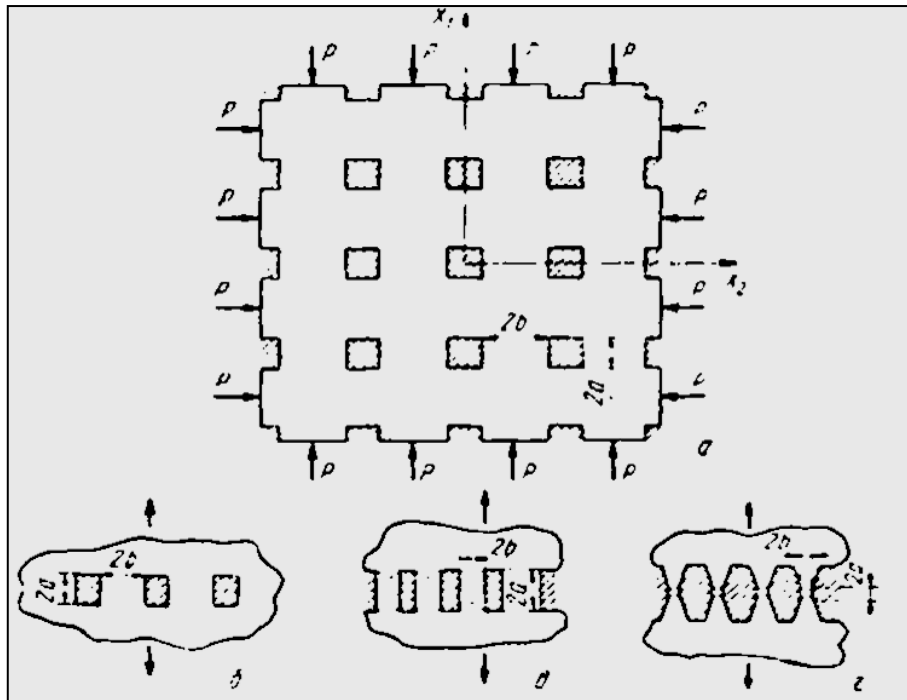


Рис. 4.11. Модель Томасона злиття мікропорожнин [111]

Розглядаючи зростаючу пору як центральну тріщину радіуса  $a$  в нескінченному тілі [157], відношення коефіцієнту інтенсивності напруги до прикладеного навантаження можна надати у вигляді (4.2):

$$\frac{K}{\sigma} = 2\sqrt{\frac{a}{\pi}} \quad (4.2)$$

де  $a$  – радіус тріщини (половина довжини пори);  $K$  – коефіцієнт інтенсивності напруги;  $\sigma$  – нормальна складова напруги.

Припускаючи, що розмір зони пластичної деформації в напрямку дії нормальної компоненти можливо визначити згідно рівняння (4.3) було підраховано експериментально отриманий розмір зони пластичної деформації.

$$d_y = \frac{c}{2} - \frac{a}{2} \quad (4.3)$$

де  $a$  – половина довжини пори;  $c$  – розмір частки, на який утворилася пора.

Вихідні дані, за якими виконувалися розрахунки та отримані результати узагальнено та наведено в табл. 4.3.

Виходячи з отриманих результатів, можливо припустити, що при зародженні та розповсюдженні в'язкого руйнування зсувна компонента деформації відіграє не менш важливу роль ніж нормальна, тобто розтягуючи складова.

Таблиця 4.3

Результати кількісного аналізу розміру зони пластичної деформації

Розмір частки, мкм	Експериментальні результати	
	Розмір пор, мкм	Розмір зони пластичної деформації
14	64	25
26	87	30,5
32	107	48
38	131	71,3

#### 4.5. Висновки

1. Аналіз отриманих даних показав, що зі збільшенням товщини спостерігається збільшення областей локалізації пластичної деформації, які призводять до зросту в'язкої складової зламу. Разом з цим, на зламах також присутні елементи квазікрихкого руйнування.

2. Сумісний аналіз даних фрактаграфічного та кореляційного методів дослідження дозволив відокремити хімічні елементи, що мають істотний вплив на ударну в'язкість: сульфіді і фосфіді.

3. Проведений комплекс досліджень показав, що основними місцями зародження пор у структурі сталі 10Г2ФБ не залежно від товщини є поверхні розділу сульфід-матриця. Пори, що утворюються на поверхні розділу сульфід-матриця зароджуються і зростають у напрямку джерела розтягуючих напруг при малих показниках пластичної деформації.

4. Виявлені частки карбідів утворюють пори на власних поверхнях розділу тільки при дії великого ступеня пластичної деформації, про що свідчить

розміри пор навколо часток цього типу. Більшість карбідів і нітридів є зруйнованими, що свідчить про дію нормальної складової напруги.

5. Зародження в'язкого руйнування, ймовірно, можливо описати дією трьох механізмів: початкова стадія – формування дислокаційних петель навколо частки (модель Броека); наступні стадії зросту пори відбуваються за рахунок накопичення дислокацій. При цьому, ця стадія відбувається під дією обох компонентів напруги нормальної і зсувної. Саме за таких умов можливо зростання пор у двох напрямках (у площині) вздовж та поперек прикладеного навантаження.



**РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ  
МЕТАЛОПРОКАТУ РІЗНОЇ ТОВЩИНИ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ  
БУДІВЕЛЬНИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ**

**5.1. Аналіз взаємозв'язку між товщиною металопрокату та комплексом механічних властивостей сталі 10Г2ФБ**

Для аналізу залежності механічних властивостей від товщини листа, був проведений комплекс досліджень, результати якого наведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1

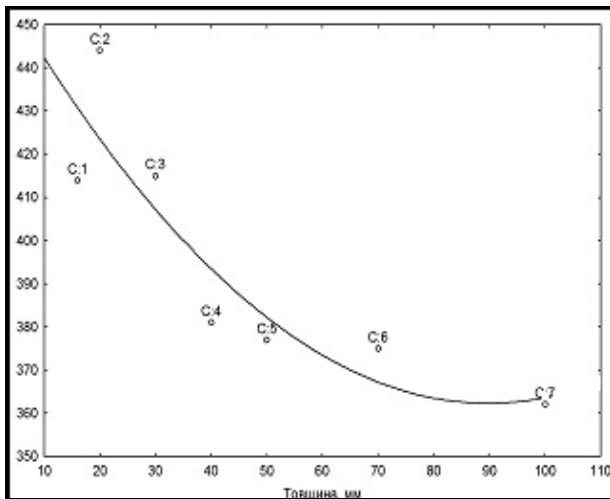
Комплекс механічних характеристик сталі 10Г2ФБ

Товщина, мм	$\sigma_T$ , Мпа	$\sigma_B$ , Мпа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	KCV <sup>-20°C</sup> , Дж\см <sup>2</sup>
16	415	525	31	59	21
20	445	545	30	64	21
30	415	525	29	70	21
40	380	500	32	71	18
50	375	540	29	60	10
70	375	545	32	56	15
100	360	565	30	49	14

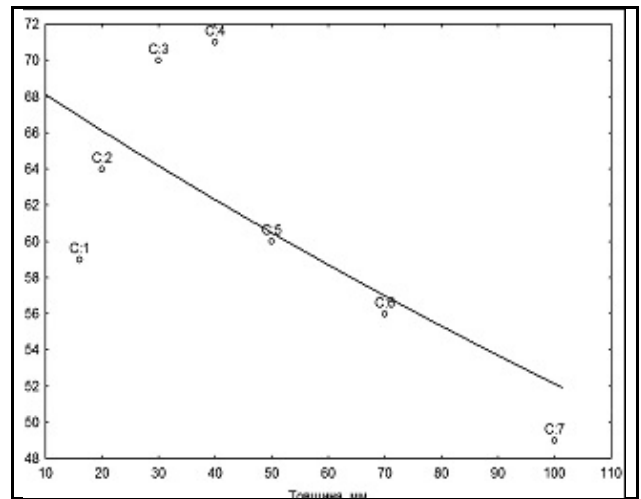
За результатами досліджень було побудовано математичні моделі взаємозв'язку між механічними характеристиками та товщиною металопрокату. При побудові моделей застосовувався математичний апарат одномірного регресійного аналізу. Загальний вид рівнянь та відповідні коефіцієнти наведені у табл 5.2. Графічна інтерпретація отриманих моделей наведена на рис. 5.1 а-д.

Для оцінки адекватності отриманих моделей застосовувався квазіньютонівській метод залишків, графічна інтерпретація якого (графік розподілу залишків) наведено на рис. 5.2 а-д.

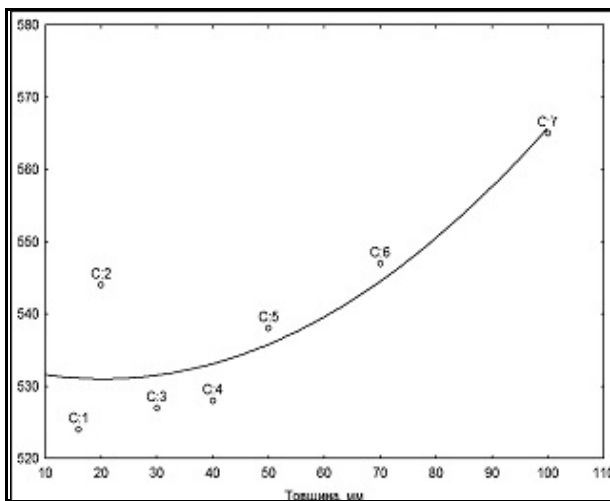
Аналіз наведених залежностей (див. рис. 5.2 а-д) показує, що, для всіх моделей, залишки з високим ступенем точності лягають на пряму, яка відповідає нормальному закону розподілу. Тому гіпотеза про нормальний розподіл помилок приймається. На рис. 5.3 а-д наведені графіки розподілу залишків.



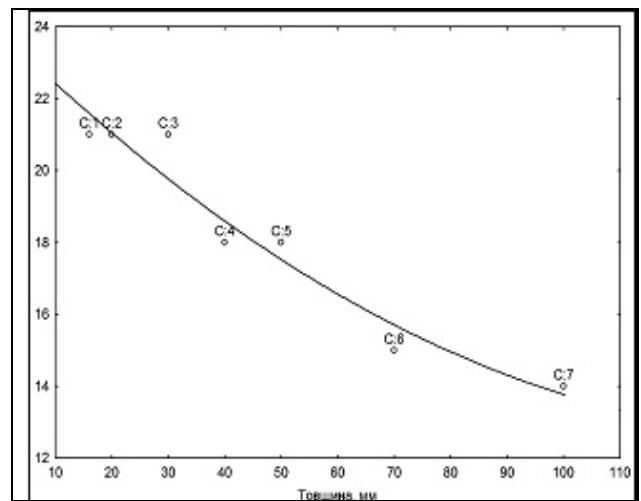
а



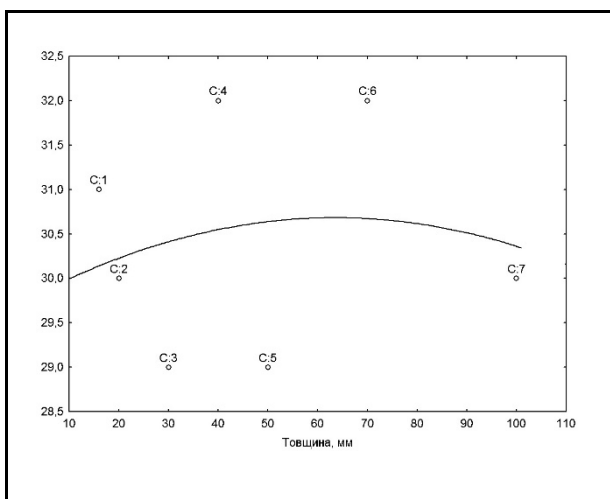
г



б



д



в

Рис. 5.1. Загальний вигляд отриманих регресійних моделей: а – границя плинності; б – границя міцності; в – відносне подовження; г – відносне видовження; д – ударна в'язкість

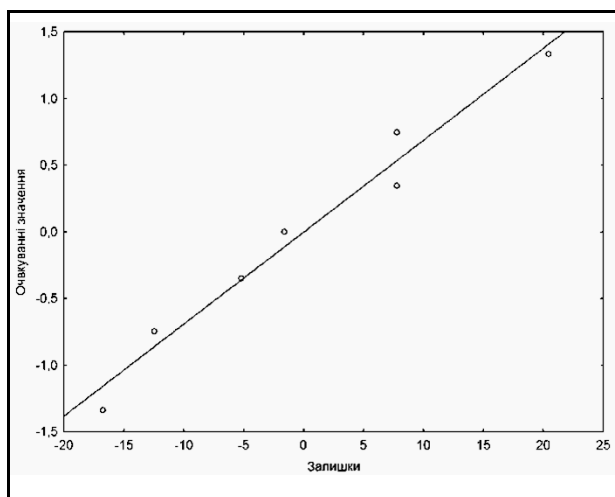
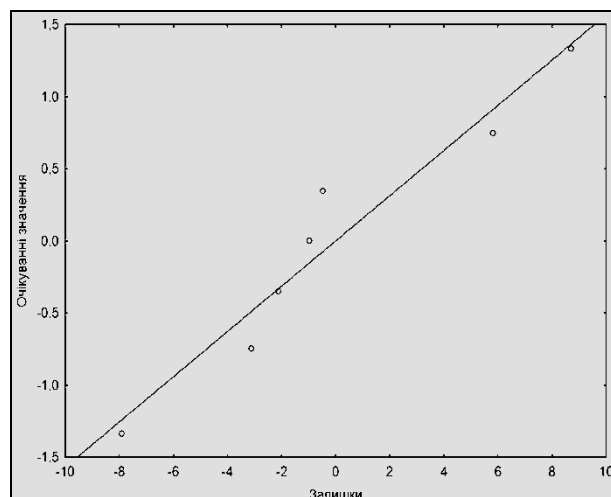
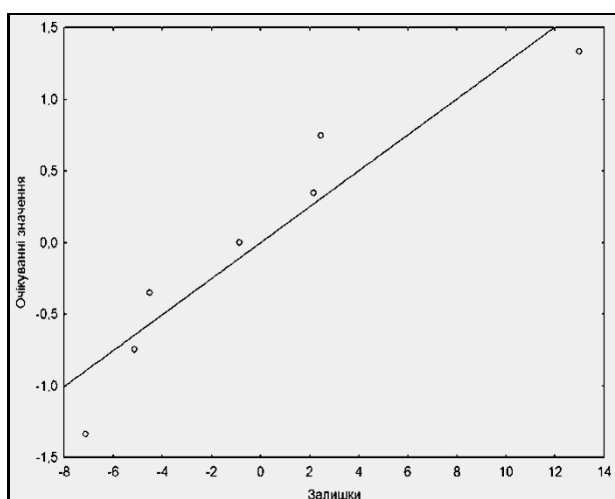
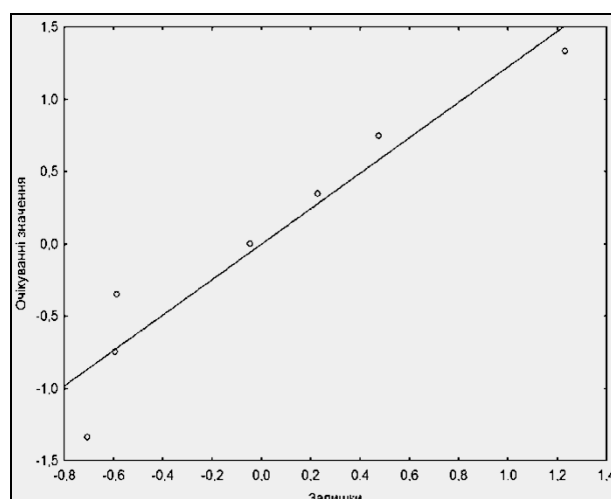
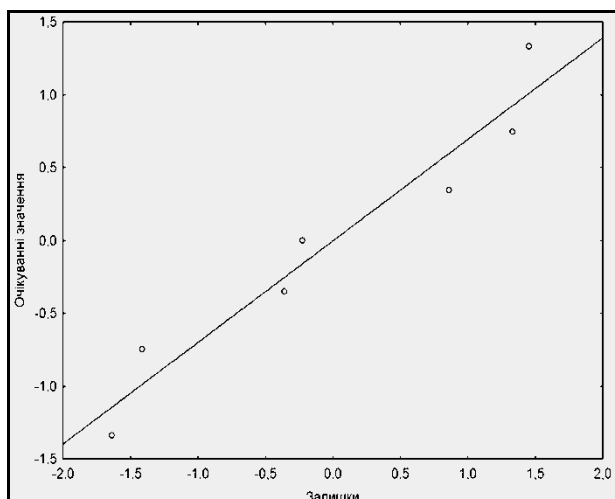
*a**z**б**д**в*

Рис. 5.2. Графіки розподілу залишків на нормальному ймовірнісному папері: *a* – границя плинності; *б* – границя міцності; *в* – відносне подовження; *z* – відносне видовження; *д* – ударна в'язкість

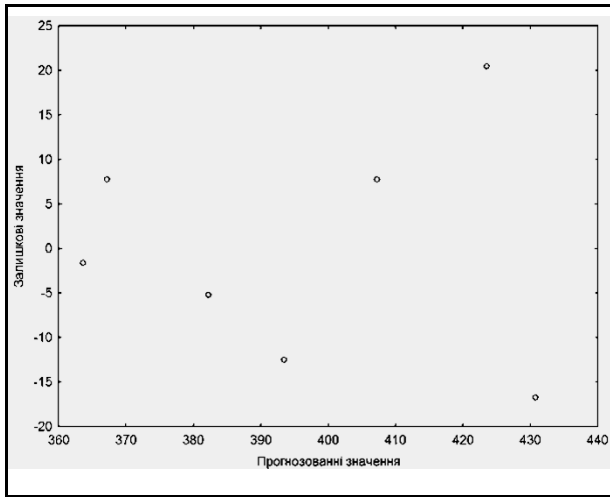
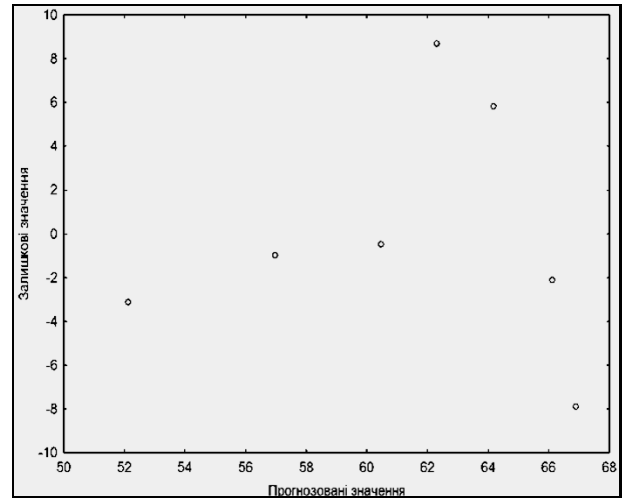
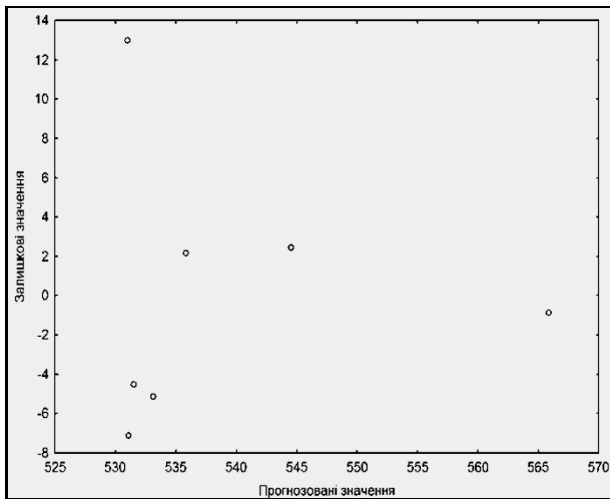
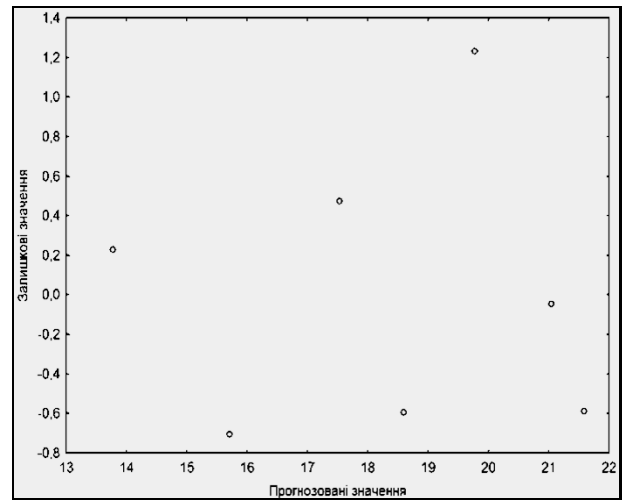
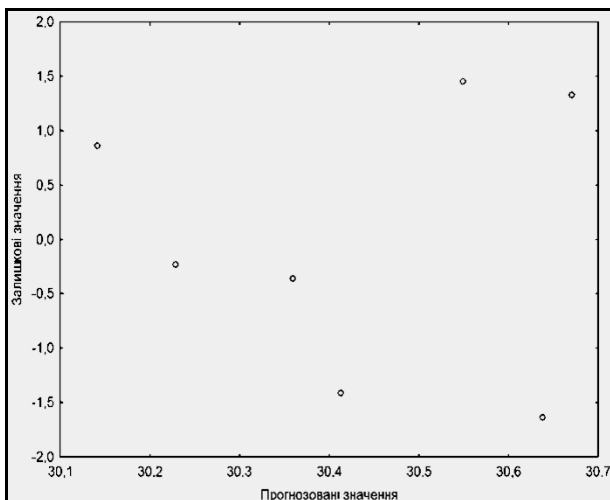
*a**z**б**д**в*

Рис. 5.3. Розподіл залишків: *a* – границя плинності; *б* – границя міцності; *в* – відносне подовження; *z* – відносне видовження; *д* – ударна в'язкість

Загальні характеристики отриманих моделей

Функція відгуку	Рівняння	Коефіцієнти моделі		
		$b_0$	$b_1$	$b_2$
Границя плинності	$\sigma_m = b_0 + b_1 * d + b_2 * d^2$	463,669	-2,258	0,013
Границя міцності	$\sigma_a = b_0 + b_1 * d + b_2 * d^2$	533,282	-0,224	0,006
Відносне видовження	$\delta = b_0 + b_1 * d + b_2 * d^2$	29,715	0,031	-0,001
Відносне звуження	$\psi = b_0 * \exp(b_1 * d)$	70.160	-0,003	
Ударна в'язкість (+20°C)	$KCV = b_0 + b_1 * d + b_2 * d^2$	23,923	-0,155	0,001

З наведених графіків випливає, що, для всіх моделей, залишки хаотично розкидані на площині і в їх поведінці немає закономірностей. Таким чином, отримані регресійні моделі досить адекватно описує досліджувані залежності.

## 5.2 Формоутворення сталевих каркасів. Вибір конструкції для модельного розрахунку

Відповідно до поставленої мети, в даній роботі було виконано модельний розрахунок використання елементів будівельної конструкції, виготовлених з металопрокату різної товщини та визначено область ефективного застосування даного підходу. Для цього, проаналізовано формоутворення сучасних сталевих каркасів з точки зору сприйняття елементами конструкцій зовнішніх навантажень.

Навантаження, що діють на сталевий каркас, можна розділити на три види, в залежності від їх прикладання [112]:

- вертикальні постійні та тимчасові навантаження, що діють на міжповерхові перекриття та покрівлю;
- вертикальні навантаження, що передаються від перекриттів на колони;

- вертикальні навантаження від ваги зовнішніх стінових огорож, які також сприймаються колонами;
- горизонтальні навантаження від тиску вітру та інших горизонтальних впливів (наприклад, сейсмічних), що сприймаються одночасно усіма елементами каркасу.

Сталевий каркас складається з наступних основних частин [113]:

- основні несучі елементи – колони, балки, рігелі;
- міжповерхові перекриття;
- горизонтальні та вертикальні зв'язки, які забезпечують необхідну загальну горизонтальну жорсткість будівлі та мінімальну можливу деформацію по вертикалі.

Забезпечення горизонтальної жорсткості сталевих каркасів є одним із найважливіших завдань при їх проектуванні. Каркас повинен витримувати будь-які горизонтальні навантаження, навіть якщо напрямок цих навантажень може змінюватися (так звані знакозмінні динамічні навантаження) [114]. Одночасною умовою є й забезпечення мінімального рівня відхилення від вертикалі.

Теоретичний аналіз впливу зовнішнього навантаження на конструктивні елементи сталевого каркасу виконувався з застосуванням програмного комплексу SCAD [115].

Для розрахунку був прийнятий каркас (див. рис. 5.4), якій містить усі типові елементи. При цьому, враховувалося що моменти та сили діють у різних площинах (див. рис. 5.5). Розрахунок вітрових, снігових, тимчасових та постійних навантажень, підбір та перевірка підібраних перерізів здійснено також за допомогою програмного комплексу SCAD. Результати проведеного чисельного моделювання наведено у таблиці 5.4.

Сумісний аналіз даних, які наведено у табл. 5.4 та результатів, які отримано в розділі 4 даної роботи показав, що для модельного розрахунку найбільш доцільним буде обирати конструкції, які повинні сприймати майже вертикальне зовнішнє навантаження і передають його на інші елементи каркасу (*U3* згідно

термінів табл. 5.4). Використання даного типу конструкцій для моделювання дозволить безпосередньо проаналізувати взаємозв'язок між зовнішнім навантаженням та розподілом відповідної пластичної деформації по площі поперечного перерізу матеріалу.

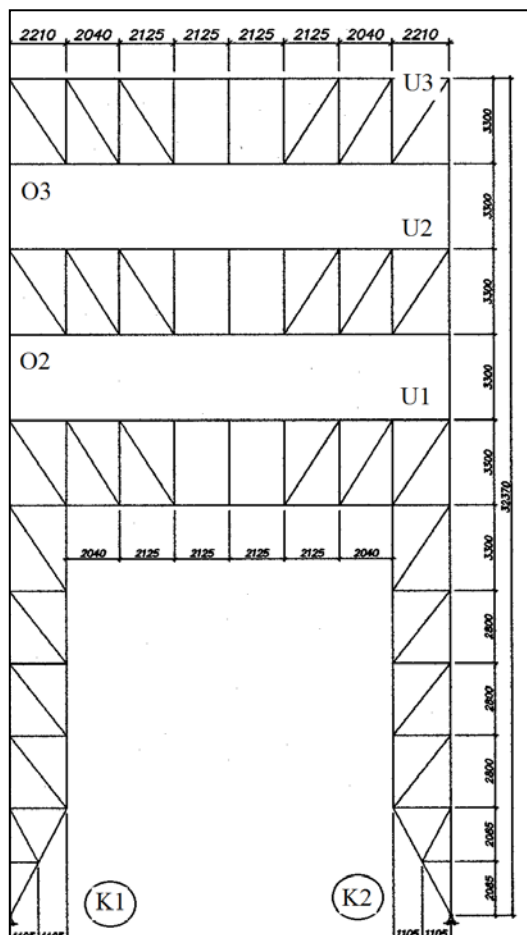


Рис. 5.4. Обраний для чисельного моделювання тип сталевго каркасу

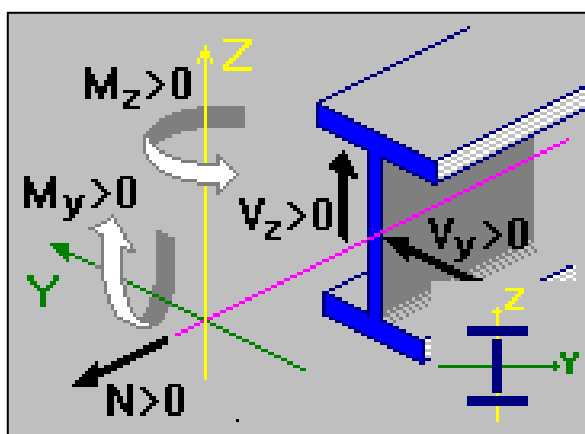


Рис. 5.5. Вихідні дані для чисельного моделювання навантаження

## Результат чисельного моделювання

Елемент каркасу	Розрахункові значення				
	N, т	My, т*м	Mz, т*м	Qy, т	Qz, т
U1	48,57	-2,61...3,36	-0,53...0,21	0,35	2,98
O2	-50,71	-2,47...3,63	-0,05...0,17	0,1	2,92
U2	52,1	-2,28...3,9	-0,58...0,27	-0,4	3,21
O3	-19,76	-2,45...3,41	-0,04...0,15	0,09	2,8
U3	28,85	-2,83...3,69	-0,47...0,19	-0,31	3,11
K1	-96,21	0,47	-0,14...0,06	-0,08	-0,05
K2	-96,21	0,47	-0,14...0,06	-0,08	-0,05

До конструкцій такого типу можливо віднести несучі конструкції покриттів, тобто стропильні ферми [116].

### 5.3 Аналіз конструкції для модельного розрахунку

Стропильні ферми сприймають навантаження в прольоті від покрівельного настилу й розташованих на ньому паро-, тепло- і гідроізоляції. Ферми складаються з верхнього й нижнього поясів і з'єднуючих їх грат - розкосів і стійок (див. рис. 5.6).

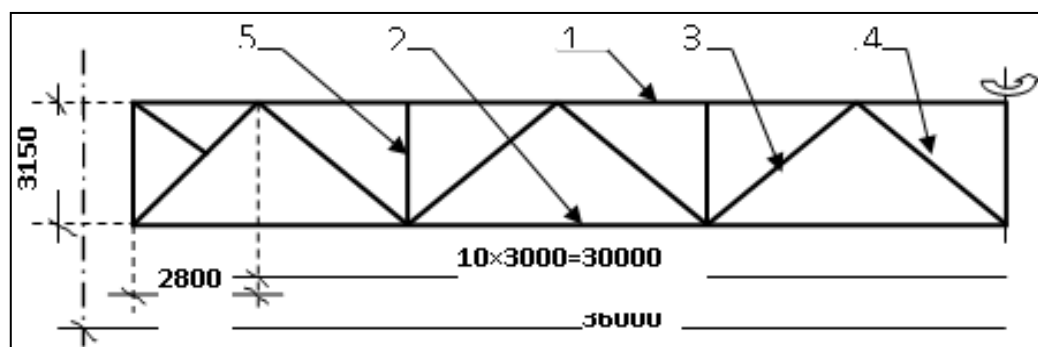


Рис. 5.6. Загальний вигляд стропильної ферми.

Залежно від обрису поясів розрізняють наступні типи ферм:

- з паралельними поясами;
- трапецієподібні;
- трикутні;



- полігональні;
- односхилі;
- аркові.

При цьому слід зазначити, що на теперішній час при прольотах до 36 м перевага віддається фермам з паралельними поясами, у яких довжини всіх розкосів і стійок однакові, що забезпечує мінімум трудовитрат при виготовленні [117].

Найбільш прості за конструктивною формою й виготовленню - ферми з паралельними поясами й трапецієподібні. Ці властивості й визначають їхнє широке застосування у виробничих і житлових спорудженнях різного призначення. Не дивлячись на більше високі техніко-економічні показники, їх використовують переважно при прольотах 18...42 м, тому що вони мають невелику будівельну висоту в порівнянні з фермами інших типів [118].

Габаритні розміри ферми для проведення модельного розрахунку були наступні: проліт ферми  $L=36$  м, крок ферми  $B=6$  м (див. рис. 5.6).

На стропильні ферми можуть діяти вертикальні й горизонтальні навантаження. До вертикальних навантажень відносяться: постійні - від ваги покрівлі, ваги ферм зі зв'язками, ваги прогонів і ліхтарів, ваги підвісної стелі; тимчасові тривалі - від нерухомого технологічного встаткування, підвішеного до ферм; тимчасові короткочасні - від снігу, рухомого вантажного технологічного встаткування. До горизонтальних відносяться: вітрове навантаження; навантаження, що виникає внаслідок гальмування рухомого обладнання великої вантажопідйомності, наприклад мостових кранів. Для проведення модельного розрахунку, відповідно до діючих рекомендацій (див. наприклад роботи [119, 120]) було визначено постійні навантаження на стропильну ферму, які узагальнено і наведено в табл. 5.5.

Тимчасові навантаження розглядалися шляхом сумісного розрахунку снігового навантаження та зосереджених навантажень від власної ваги покриття. Вага снігового покриву  $S_0$  приймалася такою, що дорівнює 0,7кПа.

Величину нормативного снігового навантаження визначали по формулі:

$$S_n = S_0 \mu \gamma_F \quad (5.1)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт переходу схилу снігового покриву на землі до ваги снігового покриву на покритті ( $\mu = 1$ );  $\gamma_F$  - коефіцієнт надійності по сніговому навантаженню - приймаємо рівним  $\gamma_F = 1,4$  (з урахуванням співвідношення норм ваги покриття й снігового покриву).

Таким чином, розрахункове снігове навантаження отримали таким, що дорівнює  $S_n = 0,7 * 1 * 1,4 = 0,98$  кПа.

Таблиця 5.5

## Постійні навантаження на стропильну ферму

№ п/п	Елементи конструкцій	Вид навантаження		
		Нормативне навантаження, кПа	Коефіцієнт надійності, $\gamma_F$	Розрахункове навантаження, кПа
1.	<i>Гравійний захист</i>	0,4	1,3	0,52
2.	<i>Гідроізоляція</i>	0,2	1,3	0,26
3.	<i>Стяжка</i>	0,4	1,3	0,52
4.	<i>Ж. Б плита 3х6</i>	1,6	1,1	1,76
	<i>Усього</i>	$q_n = 2,6$		$q = 3,06$

Визначення зосереджених навантажень від власної ваги покриття й снігу до прикладеного верхнього поясу ферми (розрахункове вузлове навантаження) здійснювали згідно рівняння (5.2):

$$P = (q + S_n) * d * B \quad (5.2)$$

де  $q$  - розрахункове навантаження, кПа;

Таким чином отримуємо:  $P = (3,06 + 0,98) * 3 * 6 = 72,72$  кН.

Поздовжні зусилля в стрижнях стропильних ферм визначаються методами будівельної механіки в припущенні шарнірного з'єднання стрижнів у вузлах [121]. Для підбора розтинів визначають розрахункові зусилля в стрижнях, тобто найбільші зусилля, які можуть виникнути при різних сполученнях постійних і

тимчасових навантажень. Відповідні розрахунки узагальнено та наведено у вигляді табл. 5.6.

Таблиця 5.6

Зусилля в стрижнях ферми й довжини елементів

Елемент	Одиничне зусилля, кН	Розрахункове зусилля, кН	Геометрична довжина $l$ , м	Розрахункова довжина $l_x$ , м	Розрахункова довжина $l_y$ , м
<i>ВП</i>	-16,79	-1220,97	3	3	3
<i>НП</i>	16,31	1186,06	6	6	12
<i>Д1</i>	-7,35	-534,49	4,214	1,69*	4,214
<i>Д2</i>	6,21	451,59	4,35	4,35	4,35
<i>V</i>	-1	-72,72	3,15	2,52**	3,15

#### 5.4 Модельний розрахунок стропильної ферми

Модельний розрахунок металоконструкцій здійснювали за наступною методикою [122]. Центрально-центрально-розтягнуті елементи розраховували на міцність по формулі:

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq R_y \cdot \gamma_c, \quad (5.3)$$

де  $\sigma$  - напруга в елементі рами, кН/см<sup>2</sup> (МПа);  $N$  – поздовжня сила, кН;  $A$  – площа перетину елемента, см<sup>2</sup>;  $R_y$  – розрахунковий опір сталі розтягання по границі текучості.

Центрально-стиснені елементи розраховуємо на стійкість по формулі:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi \cdot A} \leq R_y \cdot \gamma_c, \quad (5.4)$$

де  $\varphi$  - коефіцієнт поздовжнього вигину ( з табл. 72 СНіП II-23-81\* залежно від гнучкості  $\lambda$  і розрахункового опору  $R_y$ );

Модельний розрахунок було проведено на стропильній фермі, яку схематично наведено на рис. 5.7.

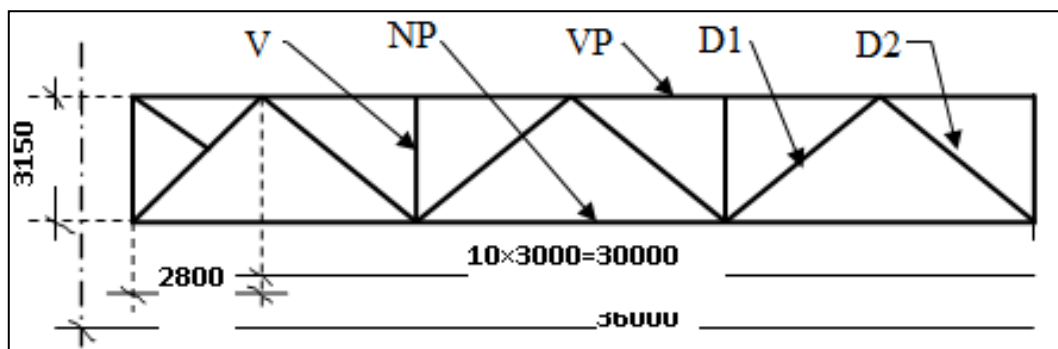


Рис. 5.7. Конструкція стропильної ферми, яка була прийнята до модельного розрахунку

Моделювання проводилось за трьома варіантами компоновки:

Варіант 1. Ферму виготовлено з будівельної сталі 09Г2С. При цьому застосовувалися елементи однакової товщини (60 мм); для розрахунку використовувалися дані літературних джерел (див. наприклад роботу [122]).

Варіант 2. Ферму виготовлено з сталі 10Г2ФБ. При цьому застосовувалися елементи однакової товщини (60 мм); для розрахунку використовувалися дані літературних джерел (див. наприклад роботу [123]).

Варіант 3. Ферму виготовлено з сталі 10Г2ФБ. При цьому використовувалися елементи різної товщини: верхній пояс (VP) – товщина 100мм; нижній пояс (NP) – товщина 70мм; раскоси (D1) – товщина 70мм; раскоси (D2) – товщина 50мм; ребра жорсткості (V) – товщина 20 мм. Товщину металопрокату для конструктивних елементів ферми підбирали відповідно до результатів, отриманих в розділі 4 даної роботи. В якості даних для модельного розрахунку використовували результати дослідження механічних властивостей, які узагальнено у таблиці 5.1 даної роботи.

Результати модельного розрахунку розтинів стрижнів для усіх варіантів стропильної ферми наведено у табл. 5.7.

Ефективність запропонованого підходу для виробництва стропильної ферми оцінювали за допомогою співвідношення між економією у вазі й подорожчанням, одержуваним у результаті підвищення вартості матеріалу, який використовується [124].

## Модельний розрахунок розтинів

Елемент	Розрахункове зусилля, кН	Коефіцієнт умови роботи $\gamma_c$	Розтин	Площа розтину
<b>Варіант 1</b>				
VP	-1220,97	0,8	L 140×60	74,8
NP	1186,06	0,95	L 100×60	38,4
D1	-534,49	0,9	2L 110×60	34,4
D1	451,59	0,95	2L 63×60	14,56
V	-72,72	0,95	2L 56×60	10,82
<b>Варіант 2</b>				
VP	-1220,97	0,8	L 140×60	54,6
NP	1186,06	0,95	L 100×60	23
D1	-534,49	0,9	2L 110×60	30,4
D1	451,59	0,95	2L 63×60	8,76
V	-72,72	0,95	2L 56×60	9,92
<b>Варіант 3</b>				
VP	-1220,97	0,8	L 140×100	49,4
NP	1186,06	0,95	L 100×70	18,76
D1	-534,49	0,9	2L 110×70	30,4
D1	451,59	0,95	2L 63×50	7,78
V	-72,72	0,95	2L 56×20	9,92

Економія у вазі в загальному випадку визначається по формулі (5.5) (дивись наприклад роботу [117]):

$$\Delta B = \frac{G_{\Sigma} - G_B}{G_{\Sigma}} \cdot 100\% = (1 - \alpha)100\% \quad (5.5)$$

де  $\alpha = G_B / G_{\Sigma}$  – коефіцієнт зниження ваги, дорівнює відношенню ваги конструкції й еталонного варіанту. У якості еталонного було обрано варіант 1 стропильної ферми.

У табл. 5.8 представлений розрахунок необхідної кількості металу, необхідного для виготовлення стропильної конструкції з розглянутих сталей.

## Розрахована маса стропильної ферми

Елемент	Геометрич на довжина l, м	Площа розтину А, см <sup>2</sup>	Обсяг елемента, см <sup>3</sup>	Маса елемента, кг	Кількість елементів п, шт.	Маса п елементів в, кг
<b>Варіант 2</b>						
VP	3	54,6	16380	128,583	12	1543
NP	6	23	13800	108,33	6	650
D1	4,214	30,4	12813,6	100,587	6	603,5
D1	4,35	8,76	3810,6	29,9	6	179,5
V	3,15	9,92	3124,8	24,53	7	171,7
Усього:						3147,7
<b>Варіант 3</b>						
VP	3	49,4	14820	116,337	12	1396
NP	6	18,76	11256	88,36	6	530,2
D1	4,214	30,4	12813,6	100,587	6	603,5
D1	4,35	7,78	3384,3	26,567	6	159,4
V	3,15	9,92	3124,8	24,53	7	171,7
Усього:						2860,8

Аналіз наведених даних показує, що застосування металопрокату різної товщини для виробництва стропильної ферми дозволяє знизити металоємність конструкції без втрати її несучої здатності.

### **5.5 Модельна оцінка економічної ефективності застосування металопрокату різної товщини для виробництва будівельних конструкцій**

Після проведених розрахунків по підборі розтинів елементів стропильної ферми й визначення металоємності обраної конструкції проведено модельна вартісна оцінка доцільності використання запропонованого підходу при виробництві будівельних конструкцій.

Вартість металевих конструкцій складається з таких частин [125]: вартість проектування (2-3%); вартість металу й інших матеріалів - електроди, захисні матеріали, фарби й т.д. (40-60%); витрати виробництва, які залежать від механічної забезпеченості підприємства (20-25%); транспортні витрати на

перевезення конструкцій до місця будівництва (5-7%); витрати на монтаж конструкцій (15-25%). Таким чином, кошторис виробництва будівельної конструкції наближено можливо оцінити за рівнянням (5.6):

$$\text{Вартість}=(C_{II}+C_M)K_H K_{II} \quad (5.6)$$

де  $C_{II}$  – вартість привезеної на об'єктний склад конструкції;  $C_M$  – вартість монтажу, що визначається одиничною розцінкою й системою поправочних коефіцієнтів;  $K_H=1,086$ ,  $K_{II}=1,08$  – коефіцієнти накладних витрат і прибутку.

Застосування ефективних сталей підвищеної міцності й прогресивних технологічних схем забезпечує економію сталі в основних несучих елементах. При порівнянні ефективних марок сталей за основу приймають сталь марки С245, а за характеристику – коефіцієнт економії  $K_e$ . Він характеризує величину економії на 1 тону ефективної сталі з урахуванням рівня фактичного використання розрахункового опору в розтягнутих, стислих, гнутих елементах. Значення коефіцієнта  $K_e$  залежно від міцності може становити в межах від 0,06 до 0,6.

Зменшення вартості внаслідок застосування в конструкціях ефективних марок сталей та площин поперечного перерізу (профілів) визначають по формулі (5.7):

$$\Delta\text{Вартість}=C_B(1+K_e)-C_e \quad (5.7)$$

де  $C_B$  – вартість конструкцій з базової марки сталі;  $C_e$  – вартість конструкції з ефективного профілю.

Економія металу за рахунок удосконалення конструктивного рішення характеризується будівельним коефіцієнтом, що відображає якість конструктивної форми й компонування по витраті матеріалу, вартості, термінів будівництва й інших техніко-економічних показників. При цьому зменшення будівельного коефіцієнта впливає на трудомісткість і вартість більше, ніж зменшення маси. Це стосується не тільки будівельних коефіцієнтів

конструктивного елемента, але й усього спорудження в цілому [125].

В табл. 5.9 представлена порівняльна оцінка необхідної кількості металу на виробництво стропильної ферми за усіма трьома варіантами. Для розрахунків використовувався кошторис (прайс) на металопрокат, який діяв в Україні 2021 році.

Таблиця 5.9

Модельна (попередня) оцінка економічної ефективності

<b>Характеристики металевої конструкції</b>	<b>Варіант 1</b>	<b>Варіант 2</b>	<b>Варіант 3</b>
<i>Витрата сталі на стропильну ферму, т</i>	4,3675	3,1477	2,8608
<i>Вартість 1 т металу, грн</i>	15 600	17 600	18 600...23 000
<i>Вартість металу стропильної ферми, грн</i>	68 133	58 547	53 211
<i>Процентне співвідношення вартості ферми, %</i>	100	85,9	78,1

Аналіз наведених в таблиці даних показує, що використання стропильної ферми з різними товщинами конструктивних елементів може призвести до зниження вартості виробу більш ніж на 20% порівняно з класичним варіантом (варіант 1).

## 5.6 Висновки

1. Проведено комплекс модельних досліджень, які спрямовано на аналіз можливості використання металопрокату з низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ різної товщини при виготовленні будівельних металевих конструкцій, зокрема стропильної ферми.



2. З використанням математичного апарату одномірного регресійного аналізу побудовано математичні моделі взаємозв'язку між механічними характеристиками та товщиною металопрокату якій мають вигляд поліному другого порядку. Адекватність отриманих моделей перевірено за квазіньютонівським методом залишків.

3. З використанням програмного комплексу SCAD проаналізовано вплив зовнішнього навантаження на конструктивні елементи сталевого каркасу. Враховуючи отримані в даній роботі результати щодо взаємозв'язок між зовнішнім навантаженням та розподілом пластичної деформації по площі поперечного перерізу матеріалу, запропоновано для модельного розрахунку прийняти конструкції, які сприймають зовнішнє навантаження у вертикальному напрямку, зокрема стропильну ферму.

4. Виконано теоретичний аналіз та визначено значення постійних і тимчасові навантажень на стропильну ферму. Отриманні результати використано для подальшого модельного розрахунку.

5. Проведено модельний розрахунок металоконструкцій. Аналіз отриманих результатів показав, що застосування металопрокату різної товщини для виробництва стропильної ферми призводить до зниження металоємності конструкції без втрати її несучої здатності. Ефективність запропонованого підходу оцінювали за допомогою співвідношення між економією у вазі в порівнянні з класичним варіантом компоновки стропильної ферми.

6. Виконано модельну оцінку вартості використання запропонованого підходу для виробництві будівельних конструкцій. Аналіз отриманих даних показав, що використання стропильної ферми з різними товщинами конструктивних елементів призводить до зниження вартості готового виробу більш ніж на 20% в порівнянні з класичним варіантом компоновки стропильної ферми.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведений комплекс досліджень дозволив стабілізувати фізичну нелінійність для зварних будівельних металевих конструкцій на основі встановлення взаємозв'язку між товщиною металопрокату та загальними металофізичними принципами розповсюдження та концентрації пластичної деформації.

2. Мікроструктурний аналіз показав, що мікроструктурними складовими усіх досліджуваних систем є ферит та перліт. Сталь товщиною 16 мм має ферито- перлітну структуру у співвідношенні 70% - 30% відповідно. Зі збільшенням товщини збільшується відсотковий вміст феритної складової з одночасним зменшенням відсотку перліту. Для сталі товщиною 100 мм мікроструктура складається з 80 % фериту та 20 % перліту. Ферит формується у виді зерен поліедричної форми, а перлітні колонії розташовано у ліквацийних полосах.

3. На підставі отриманих кількісних даних щодо залежності відсоткового вмісту структурних складових від товщини металопрокату було побудовано відповідні регресійні моделі. Аналіз моделей показує, що аналізовані залежності мають нелінійний характер і описуються логарифмічними рівняннями типу  $Y=b_0+b_1 \times \log_{10}(x)$ .

4. Дослідження тонкої структури показали, що зі збільшенням товщини металопрокату спостерігається зріст розмірів структурних складових, при цьому їх відсоткове співвідношення майже не змінюється (зміни знаходяться у межах допустимої похибки). З огляду на масштабний фактор, можна сказати, що швидкість охолодження зі збільшенням товщини металопрокату змінюється. Про це свідчить, наприклад, збільшення розмірів колоній перліту, при зменшенні загальної кількості колоній.

5. На підставі отриманих даних було побудовано математичні моделі взаємозв'язку між геометричними розмірами структурних складових та товщиною металопрокату. В якості аналітичних моделей було отримано логарифмічні рівняння регресії.

6. Аналіз отриманих даних показав, що зі збільшенням товщини металопрокату спостерігається збільшення областей локалізації пластичної деформації, які призводять до зросту в'язкої складової зламу. Разом з цим, на зламах також присутні елементи квазікрихкого руйнування.

7. Сумісний аналіз даних фрактаграфічного та кореляційного методів дослідження дозволив відокремити хімічні елементи який мають істотний вплив на ударну в'язкість: сульфіді і фосфіді.

8. Проведений комплекс досліджень показав, що основними місцями зародження пор у структурі сталі 10Г2ФБ не залежно від товщини металопрокату є поверхні розділу сульфід-матриця. Пори, які утворюються на поверхні розділу сульфід-матриця зароджуються і зростають у напрямку джерела розтягуючих напруг при малих показниках пластичної деформації.

9. Виявлені частки карбідів утворюють пори на власних поверхнях розділу тільки при дії великого ступеня пластичної деформації, про що свідчить розміри пор навколо часток цього типу. Більшість карбідів і нітридів є зруйнованими, що свідчить про дію нормальної складової напруги.

10. Зародження в'язкого руйнування, ймовірно, можливо описати дією трьох механізмів: початкова стадія – формування дислокаційних петель навколо частки (модель Броека); наступні стадії зросту пори відбуваються за рахунок накопичення дислокацій. При цьому, ця стадія відбувається під дією обох компонентів напруги нормальної і зсувної. Саме за таких умов можливо зростання пор у двох напрямках (у площині) вздовж та поперек прикладеного навантаження.

11. Проведено комплекс модельних досліджень, які спрямовано на аналіз можливості використання металопрокату з низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ різної товщини при виготовленні будівельних металевих конструкцій, зокрема стропильної ферми.

12. З використанням математичного апарату одномірного регресійного аналізу побудовано математичні моделі взаємозв'язку між механічними характеристиками та товщиною металопрокату якій мають вигляд поліному

другого порядку. Адекватність отриманих моделей перевірено за квазіньютонівським методом залишків.

13. З використанням програмного комплексу SCAD проаналізовано вплив зовнішнього навантаження на конструктивні елементи сталевого каркасу. Враховуючи отримані в даній роботі результати щодо взаємозв'язку між зовнішнім навантаженням та розподілом пластичної деформації по площі поперечного перерізу матеріалу, запропоновано для модельного розрахунку прийняти конструкції, які сприймають зовнішнє навантаження у вертикальному напрямку, зокрема стропильну ферму.

14. Виконано теоретичний аналіз та визначено значення постійних і тимчасові навантажень на стропильну ферму. Отриманні результати використано для подальшого модельного розрахунку.

15. Проведено модельний розрахунок металоконструкцій. Аналіз отриманих результатів показав, що застосування металопрокату різної товщини для виробництва стропильної ферми призводить до зниження металоємності конструкції без втрати її несучої здатності. Ефективність запропонованого підходу оцінювали за допомогою співвідношення між економією у вазі в порівнянні з класичним варіантом компоновки стропильної ферми.

16. Виконано модельну оцінку вартості використання запропонованого підходу для виробництві будівельних конструкцій. Аналіз отриманих даних показав, що використання стропильної ферми з різними товщинами конструктивних елементів призводить до зниження вартості готового виробу більш ніж на 20% в порівнянні з класичним варіантом компоновки стропильної ферми.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. ДБН В.1.2-14:2008. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. – [Чинний від 2008-09-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2008. – 62 с.
2. ДСТУ 27772:2015. Прокат для будівельних сталевих конструкцій. Технічні умови. – [Чинний від 2015-07-01]. – Київ : Національний стандарт України, 2015. – 30 с.
3. González M. J., Navarro J. Sustainable construction practices in residential buildings: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 265. P. 121-134. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121-134.
4. Soares D. B. M. H. *Design of Steel Structures*. – London : Springer, 2009. – 425 s.
5. ASTM. *Handbook of Comparative World Steel Standards*. – Baltimore : ASTM International, 2002. – 658 s.
6. Визначення, класифікація та застосування сталі. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://tdvikar.com.ua/vyznachennia-klyasyfikatsiia-ta-zastosuvannia-stali/> – Дата звернення: 20.09.2023
7. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. – [Чинний від 2015-01-01]. – Київ : [Видавництво], 2014. – 205 с. (Інформація та документація).
8. Приходько І. Ю., Воробей С. О., Разносілін В. В. Шляхи зменшення різнотовщинності товстолистового прокату. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 349-357. DOI: 10.52150/2522-9117-2023-37-349-357.
9. Вердея Гонсалес Ж. І., Фернандес-Гонсалес Д., Вердея Гонсалес Л. Ф. *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Steel*. – Switzerland : Springer International Publishing, 2023. – 332 p.. DOI: 10.1007/978-3-031-05702-1.

10. High-Strength Structural and High-Strength Low-Alloy Steels. – ASM Handbook Committee: 1990. – 423p. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v01.a0001025>.
11. ASM International. High-Strength Structural and High-Strength Low-Alloy Steels. Vol. 1. ASM Handbook. – Materials Park, OH : ASM International, 2016. – С. 389-423. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v01.a0001025>.
12. Totten G. Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies. – Boca Raton, FL : CRC Press, 2006. – 848 p.
13. Сидоренко А. М., Петров О. І. Технологія термічного зміцнення арматурного прокату. – Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2020. – Т. 34. – С. 202-218. – DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2020-34-202-218>.
14. Пшеничний Г. І., Овчаренко В. І. Технологія термічної обробки металів. – К.: Вища школа, 2005. – 312 с.
15. Hulka K., Heisterkamp F. HSLA Steels Technology and Applications. – International Conference on Technology and Applications of HSLA Steels. – Philadelphia, 1983. – P. 915–924.
16. Roberts W., Sandberg A., Siwecki T., Werlefors T. Steels Technology and Applications. – Metals Park, Ohio : ASM, 1984. – P. 67-84.
17. Krauss G. Steels. Processing, Structure and Performance. – Metals Park, Ohio : ASM International, 2006. – 593 p.
18. Gladman T., Dulieu D., McIvor I. D. Structure – property relationships in high strength microalloyed steels. – International Conference «Micro – Alloying 75», Washington, USA, 1-3 october 1975. – Metals Park, Ohio : 1975. – p. 32–58.
19. Tamura L., Ouchi C., Tanaka T., Seikine H. Thermomechanical Processing of High Strength Low Alloy Steels. – Bodmin : Robert Hartnoll Ltd., 1988. – 248 p.
20. Lojkowski W., Porowski S. Pressure effect on grain boundary dewetting and pre-melting transition in a Fe-6%Si bicrystal. – Joint AIRAPT/APS Conference

- on High Pressure Science and Technology, Colorado Springs, USA, 1993. – P. 125-131.
21. Halmos G. T. Roll Forming Handbook. – New York : CRC Press, 2012. – 584p.
22. Бекетов А. В., Сухомлин Г. Д., Лаухін Д. В., Сахнік Н. В., Кузьмичев Є. М., Тараненко А. А., Снизжковська Ю. Л. Вплив режимів контролю за прокаткою на структуру та властивості низьковуглецевої мікролегованої сталі. – Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. – 2009. – Вип. 48, Ч. 3. – С. 237-242.
23. Дейнеко Л. Н., Крипак І. Ю., Нікітченко В. С., Назарець Є. Г., Волкова А. С., Литвиненко Є. І. Ефективна технологія упрочнюючої термообробки виробів з інструментальних і конструкційних марок сталей. – Обладнання та технології термічної обробки металів і сплавів. – 2003. – Ч. 1. – С. 62-66..
24. DeArdo A. J. Modern Thermomechanical Processing of Microalloyed Steel. – Proceedings of the International Conference «Microalloying '95», Pittsburgh, June 11-14, 1995. – Pittsburgh, 1995. – P. 15–35.
25. Beketov O., Laukhin D., Rott N., Schudro A. The Elaboration of Modernized Technology of Controlled Rolling Directed at the Formation of High Strengthening and Viscous Qualities in HSLA Steel. *Solid State Phenomena*. 2019. Vol. 291. P. 13 – 19.
26. Garner J., Cosgrove C. High Strength Steels for Structural Applications - A Guide for Fabrication and Welding.: British Constructional Steelwork Association, 2020. – P. 32.
27. Mathew M., George S. C., Varghese G. M. (Eds.). Innovations in Structural Engineering and Construction.: Scientific.Net, 2017. – 458p.
28. Шевчук В. М. Основи технології прокатки металів. – Київ : Вища школа, 1985. – 210 с.
29. Kutz M. Mechanical Engineers' Handbook. Third edition. Energy and Power. – Hoboken : John Wiley & Sons, Inc, 2006. – 1340 p.

30. Шевченко В. П., Дрозд В. О. Вплив термічних обробок на властивості низколегованих сталей. – Київ : Наукова думка, 2005. – 230 с.
31. Bolshakov V. I., Laukhin D. V., Sukhomlin G. D., Beketov A. V. Polygonizing controlled rolling steels for metal constructions. – Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2016. – № 5 (218). – С. 40-45.
32. Лаухін Д. В., Сухомлин Г. Д., Бекетов О. В., Іванцов С. В., Щудро А. Є., Лаухін В. Д. Вплив температурно-деформаційної обробки у міжкритичному інтервалі температур на структуру та властивості товстих листів з низьковуглецевих будівельних сталей. – Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2017. – Вып. 96. – С. 95-102
33. Bardgett W. E., Reeve L. Mechanical properties of low-carbon, low-alloy steels containing boron. – Journal Iron and Steel Institute. – 1949. – Vol. 163, No. 11. – P. 277–294.
34. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2006. – 70с.
35. ДСТУ Б В.2.6-183:2011. Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів. Загальні технічні умови. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2011. – 121с.
36. Підгурський М. І., Підгурський І. М. Проектування металевих конструкцій. Сталевий каркас одноповерхової виробничої будівлі. Теоретичні основи проектування з прикладами розрахунку. – Тернопіль : ФОП Паляниця В. М., 2021. – 236 с.
37. ДСТУ 8539:2015 Прокат для будівельних сталевих конструкцій. Загальні технічні умови. [Чинний від 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2015. 23 с.
38. Царинник О. Ю. Металеві конструкції. Спецкурс. Навчальний посібник. – Львів : Бескіт Біт, 2004. – 304 с.
39. Пічугін С. Ф. Курс лекцій із дисципліни «Металеві конструкції» для студентів, які проходять підготовку бакалаврів за спеціальністю 0901



- «Будівництво та цивільна інженерія». Частина 3. – Полтава : ПолтНТУ, 2018. – 67 с.
- 40.ДСТУ Б В.2.6-74:2008. Металеві конструкції. Норми проектування. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2008. – 43с.
- 41.ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. – Київ : МІНБУД УКРАЇНИ, 2006.
- 42.Пермяков В. О., Нілов О. О., Шимановський О. В., Белов І. Д., Лаврінченко Л. І., Володимирський В. О. Металеві конструкції: Підручник. – К.: Видавництво «Сталь», 2008. – 812 с.
- 43.Бучок Н. П. Будівельні конструкції. – Київ : Вища школа, 1996. – 651 с.
- 44.Лівінський О. М., Хоменко О. Г., Терещук М. О., Любченко І. Г., Ратушняк Г. С., Єсипенко А. Д. Металеві конструкції: Підручник для студентів вищих навчальних закладів. – К.: «МП Леся», 2018. – 306 с.
- 45.Осташ О. П. Механіка руйнування і міцність матеріалів: в 15 т. – Львів: СПОЛОМ, 2015. – Т. 15: Структура матеріалів і втомна довговічність елементів конструкцій. – 312 с.
- 46.Холявко В. В. Фізичні основи міцності та руйнування: Конспект лекцій. – Київ: Вид-во НТУУ «КПІ», 2015. – 100 с.
- 47.Пчелінцев В. О., Дегула А. І. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів: Навч. посіб. – Суми: СумДУ, 2012. – 247 с.
- 48.Шваб'юк В. І. Опір матеріалів: навчальний посібник. – К.: Знання, 2009. – 380 с.
- 49.ДСТУ Б В.2.6-199:2014 Конструкції сталеві будівельні. Вимоги до виготовлення. – Київ: Держспоживстандарт України, 2014. – 30 с.
- 50.. ДСТУ Б В.2.6-200:2014 Конструкції металеві будівельні. Вимоги до монтажу. – Київ: Держспоживстандарт України, 2014. – 25 с.
- 51.Пахолук А. П., Пахолук О. А. Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали: посібник. – Львів: Світ, 2005. – 172 с.

52. Хільчевський В. В., Кондратюк С. Є., Степаненко В. О. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: навчальний посібник. – Київ: Либідь, 2002. – 328 с.
53. Баженов В. А., Дащенко О. Ф., Коломієць Л. В., Ухов О. В. Будівельна механіка та металеві конструкції: підручник. – Одеса: Астропринт, 2001. – 432 с.
54. Білик А. С., Ковалевська Е. А. Розрахунок сталевих конструкцій будівель відповідно до єврокоду 3 та національних додатків України: посібник до ДСТУ. – Київ: Український центр сталевих будівництва, 2017. – 232 с.
55. Цурпал І. А. Механіка матеріалів і конструкцій. – Київ: Вища освіта, 2005. – 367 с.
56. Козечко, В. І. Особливості виробництва зварних труб великого діаметру та спосіб їх термічної обробки // Збірник наукових праць НГУ. — 2022. — № 68-14. — Дніпро. — С. 157-165.
57. Мильніков О. В. Опір матеріалів. – Тернопіль: Видавництво ТДТУ імені Івана Пулюя, 2005. – 212 с.
58. Бекетов, О., Лаухін, Д., Ротт, Н., Бабенко, Є., Козечко, В. Використання теорії обробки масивів експериментальних даних для аналізу технологічної схеми в виробництві прокатного металу – контрольоване прокатування / О. Бекетов, Д. Лаухін, Н. Ротт, Є. Бабенко, В. Козечко. — У: Іванов, В., Трояновська, Ю., Павленко, І., Рауц, Є., Пітель, Я. (ред.) Прогрес у проектуванні, моделюванні та виробництві VII. DSMIE 2024. Лекції в механічній інженерії. — Швейцарія: Springer, Cham, 2024.
59. Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Е. С. Опір матеріалів. – Київ: Вища шк., 1993. – 655 с.
60. Laukhin D. V., Beketov O. V., Rott N. O., Tyuterev I. A., Ivantsov S. V., Laukhin V. D. The Analysis of Interrelation between Kinetics of Propagation of Plastic Deformation and Initiation of Ductile Fracture. – Metallofiz. Noveishie Tekhnol., 2017. – Vol. 39, No. 10. – P. 1335–1346.

61. Anderson T. L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. – 4th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 500 p.
62. Іванцов С. В. Вплив параметрів структури на кінетику руйнування мікролегованих будівельних сталей: дис.... канд. тех. наук: 05.02.01 / Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». – Дніпропетровськ, 2015. – 141 с.
63. Бекетов О. В., Большаков В. І., Лаухін Д. В., Іванцов С. В., Лаухін В. Д. Дослідження взаємозв'язку між характеристиками руйнування та структурними складовими низьковуглецевих мікролегованих сталей. – *Металознавство та термічна обробка металів*. – 2016. – № 1 (72). – С. 53–58.
64. Бекетов О. В., Іванцов С. В., Тютюрев І. А., Ротт Н. О., Бабенко Є. О. Дослідження загальних особливостей розповсюдження пластичної деформації в сталях з феррито-перлітною структурою. – *Строительство, материаловедение, машиностроение*. – Дніпропетровськ, 2017. – Вып. 95. – С. 26–34.
65. Okabe T., Sekine H., Ishii K. Numerical method for failure simulations of unidirectional fiber-reinforced composites with spring element model. – *Composites Science and Technology*. – 2005. – No. 65. – P. 931–933.
66. Edelson B. J., Baldwin W. M. The effect of second phases on the mechanical properties of alloys. – *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. – 1962. – Vol. 55, No. 2. – P. 903–906.
67. Gladman T., Hoolaes B., McIvor I. D. Effect of second-phase particles on the mechanical properties of steel. – *The Iron and Steel Institute*. – 1971. – P. 68–75.
68. Reddy A. L. K. Principles of Fracture Mechanics. – New York: Wiley, 2004. – 456 p.
69. Beer F. P., Johnston E. A., DeWolf J. T., Mazurek D. F. Mechanics of Materials. – 7th ed. – New York: McGraw-Hill, 2016. – 832 p.

70. Shackelford J. F. Introduction to Materials Science for Engineers. – 8th ed. – Boston: Pearson, 2015. – 720 p.
71. de Nijs J. A. Z. Methods of Physical Metallurgy. – New York: Wiley, 1983. – 450 p.
72. ДСТУ ISO 6892:2008 Матеріали металеві. Випробування на розтягнення. – Київ: Держспоживстандарт України, 2008. – 24 с.
73. ДСТУ ISO 148-1:2010 Матеріали металеві. Випробування на ударну в'язкість. Частина 1. Метод Кізера. – Київ: Держспоживстандарт України, 2010. – 30 с.
74. ASM International. Metals Handbook. – 10th ed. – Materials Park, OH: ASM International, 1990. – 16 vols.
75. Shibli A. A. O., Qureshi S. B. Metallography: Principles and Practice. – New York: Taylor & Francis, 2010. – 340 p.
76. Лаухін, Д. В., Бекетов, О. В., Дадіверіна, Л. М., Козечко, В. І. Дослідження взаємозв'язку між температурою кінця гарячої деформації та комплексом механічних властивостей низьковуглецевих сталей на основі аналізу регресійних моделей // Математичне моделювання. — 2023. — № 2 (49). — С. 182-197.
77. Kelly R. G., Scully J. R., Shoesmith D. W., Buchheit R. G. Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering. – New York: Marcel Dekker, 2002. – 425 p.
78. Vander Voort G. F. Metallography: Principles and Practice. – 2nd ed. – New York: ASM International, 1999. – 752 p.
79. Vander Voort G. F. Metallography and Microstructure. – Materials Park, OH: ASM International, 2004. – 752 p.
80. Zhou W., Wang Z. L. Scanning Microscopy for Nanotechnology. – New York: Springer Science+Business Media, 2006. – 523 p.
81. Stokes D. J. Principles and Practice of Variable Pressure/Environmental Scanning Electron Microscopy. – Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2008. – 221 p.

82. Бекетов, О. В., Лаухін, Д. В., Дадіверіна, Л. М., та ін. Дослідження взаємозв'язку між товщиною та структурним станом металопрокату з низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ // Український журнал будівництва та архітектури. — 2024. — № 2. — С. 26-33.
83. Богданова Н. В., Богданов О. В. Математичне моделювання систем і процесів: конспект лекцій [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. — 84 с.
84. Козечко, В. А., Козечко, В. І. Особливості зміни мікроструктури і механічних характеристик при високоенергетичному навантаженні // Збірник наукових праць НГУ. — 2023. — № 74-1. — С. 154–162.
85. Law A. M., Kelton W. D. Simulation Modeling and Analysis. — New York: McGraw-Hill Publishing Co, 2000. — 560 p.
86. Лебідь Р. Д., Жуков І. А., Гузій М. М. Математичні методи в моделюванні систем: навч. посіб. для студ. Втузів. — К.: КМУЦА, 2000. — 158 с.
87. Box G. E. P., Hunter J. S., Hunter W. G. Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building. — 2nd ed. — Hoboken, NJ: Wiley, 2005. — 672 p.
88. McKenzie J. D. Statistical Methods for the Physical Sciences. — New York: John Wiley & Sons, 1986. — 360 p.
89. Bender E. A. An Introduction to Mathematical Modeling. — Dover Publications, 2012. — 138 p.
90. Димитрієва Н. Ф. Моделювання фізичних процесів: комп'ютерний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали», спеціалізації «Прикладна фізика» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. — 96 с.
91. Moghadas M. Seyed, Jaber-Douraki M. Mathematical Modelling: A Graduate Textbook. — Wiley, 2018. — 231 p.
92. Томашевський В. М., Жданова О. Г., Жолдаков О. О. Вирішення практичних завдань методами комп'ютерного моделювання: навч. посібник. — К.: Техніка, 2001. — 158 с.

93. Дербабя, В. А., Козечко, В. А., Пацера, С. Т., Войчишен, О. Л., Козечко, В. І. Експлуатаційні показники різальних інструментів з надтвердих матеріалів // Збірник наукових праць НГУ. — 2023. — № 74-1. — С. 133-142.
94. Кветний Р. Н., Богач І. В., Бойко О. Р., Софина О. Ю., Шушура О. М. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Частина 1: навчальний посібник. — Вінниця: ВНТУ, 2012. — 321 с.
95. Гліненко Л. К. Основи моделювання технічних систем: навч. посіб. для студ. ВНЗ. — Львів: Бескид Біт, 2003. — 176 с.
96. Скурихін В. І. Математичне моделювання. — К.: Техніка, 1983. — 358 с.
97. Томашевський В. М. Моделювання систем: підруч. для студ. ВНЗ. — К.: Видавнича група ВНУ, 2005. — 352 с.
98. Струтинський В. Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки: підруч. — Житомир: ЖІТІ, 2001. — 611 с.
99. Goel A. L. Software reliability models: assumptions, limitations, and applicability. — IEEE Transactions on Software Engineering. — 1985. — Vol. SE-11, No. 12. — P. 1411–1423.
100. Єріна А. М. Статистичне моделювання та прогнозування. — Київ: КНЕУ, 2001. — 170 с.
101. Miele A., Damoulakis J. N., Cloutier J. R., Tietze J. L. Sequential gradient-restoration algorithm for optimal control problems with nondifferential constraints. — JOTA. — 1974. — № 2. — P. 13.
102. StatSoft Statistica. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://statsoft.com>.
103. Microsoft Excel. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.microsoft.com/uk-ua/microsoft-365/excel>.
104. Hultgen A., Olin H. Nucleation and growth of pearlite. — Metallurgical and Materials Transactions. — 1960. — Vol. 144. — P. 356–391.
105. Бекетов О. В., Сухомлин Г. Д., Лаухін Д. В., Машковська А. В. Дослідження поверхневої енергії міжфазних границь під час дифузійного

- $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення. – *Металознавство та термічна обробка металів.* – 2015. – № 2 (69). – С. 24–29.
106. Zhang F., Zhao Y., Tan Y., Ji X., Xiang S. Study on the Nucleation and Growth of Pearlite Colony and Impact Toughness of Eutectoid Steel // *Metals.* 2019. Т. 9, № 11. С. 1133.
107. Mehl R. F. The Structure and Rate of Formation of Pearlite // *Metallography, Microstructure, and Analysis.* 2015. Т. 4, № 5. С. 423–443. DOI 10.1007/s13632-015-0226-0
108. Altenbach H., Brünig M., Kowalewski Z. L., ред. *Plasticity, Damage and Fracture in Advanced Materials.* Cham: Springer, 2020. 371 с. (*Advanced Structured Materials*; т. 121).
109. Бекетов О. В., Большаков В. І., Лаухін Д. В., Ротт Н. О., Барібін Д. О. Кількісний аналіз розміру зони локалізації пластичної деформації перед фронтом зростаючої тріщини з урахуванням структурного стану матеріалу (частина 2) // *Строительство, материаловедение, машиностроение.* 2018. Вып. 104. С. 71–76.
110. Павленко П. М. *Основи математичного моделювання систем і процесів : навч. посіб.* К. : НАУ, 2014. 274 с.
111. Васильєв, А. А. "Напруження та деформації у конструкціях". — Харків: Вид-во НТУ «ХП», 2000. — 320 с.
112. Мартинюк, І. В. "Вплив неметалевих включень на механічні властивості сталей". — Київ: Видавництво «Наукова думка», 2018. — 290 с.
113. Лаухін, Д. В. Теоретичні основи формування субструктури, структури і властивостей товстолистового прокату з низьковуглецевих мікролегованих будівельних сталей: дис. ... док. техн. наук: 05.02.01 / ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». — Дніпропетровськ, 2012. — 353 с.
114. Боллманн, В. *Кристалічні дефекти та кристалічні інтерфейси* / В. Боллманн. — Берлін: Springer Verlag, 1970. — 316 с.

115. Розенхайн, В. Т., Хамфрі, Дж. С. В. Стійкість, деформація та тріщини м'якої сталі при високих температурах / В. Т. Розенхайн, Дж. С. В. Хамфрі. — Журнал Інституту заліза і сталі. — 1973. — Т. 87. — С. 219-240.
116. Бекетов, О. В. Теоретичні основи формування субструктури переохолодженого аустеніту та механічних властивостей мікролегованих будівельних сталей: дис. ... док. техн. наук: 05.02.01 / ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». — Дніпропетровськ, 2020. — 267 с.
117. Гладун, Ю. М. "Механіка руйнування композитних матеріалів". — Київ: Видавництво «Наукова думка», 2016. — 360 с.
118. Хоменко, О. Г. Сталеві конструкції у будівництві: підручник / О. Г. Хоменко. — Глухів, 2018. — 347 с.
119. Винников, Ю. Л., Пічугін, С. Ф., Довженко, О. О., Дмитренко, А. О. Будівельні конструкції: навчальний посібник / Ю. Л. Винников, С. Ф. Пічугін, О. О. Довженко, А. О. Дмитренко. — Полтава: ТОВ «АСМІ», 2015. — 400 с.
120. Пермяков, В. О., Шимановський, О. В. Металеві конструкції: підручник для студентів вищих навчальних закладів / В. О. Пермяков, О. В. Шимановський. — К.: Сталь, 2008. — 812 с.
121. Програмний комплекс SCAD. — Режим доступу: <https://scadsoft.com/>
122. Клименко, Ф. Є., Барабаш, В. М., Стороженко, Л. І. Металеві конструкції: підручник / Ф. Є. Клименко, В. М. Барабаш, Л. І. Стороженко. — Львів: Світ, 2002. — 312 с.
123. Копиленко, О. І. "Високопрочні сталі у будівництві: властивості та застосування". — Київ: Видавництво «Наукова думка», 2011. — 240 с.
124. Нілов, О. О., Пермяков, В. О. Металеві конструкції. Загальний курс: підручник для вищих навчальних закладів / О. О. Нілов, В. О. Пермяков. — К.: Видавництво «Сталь», 2010. — 869 с.
125. Клименко, Ф. Є., Барабаш, В. М. Металеві конструкції: підручник / Ф. Є. Клименко, В. М. Барабаш. — Львів: Світ, 1994. — 280 с.



126. Стороженко, Л. І., Пашинський, В. А., Пічугін, С. Ф., Трусов, Г. М. Металеві конструкції: навчальний посібник / Л. І. Стороженко, В. А. Пашинський, С. Ф. Пічугін, Г. М. Трусов. — К.: НМК ВО, 1992. — 172 с.
127. Пічугін, С. Ф. Курс лекцій із дисципліни «Металеві конструкції» для студентів, які проходять підготовку бакалаврів за спеціальністю 0901 «Будівництво та цивільна інженерія». Частина 4 / С. Ф. Пічугін. — Полтава: ПолтНТУ, 2018. — 57 с.
128. Стороженко, Л. І. Конспект лекцій з дисципліни «Металеві конструкції» для студентів спец. 2903. Частина 2 / Л. І. Стороженко. — Полтава: ПолтНТУ, 1993. — 56 с.
129. Лялюк, О. Г., Ратушняк, О. Г. Кошторисна справа в будівництві: електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / О. Г. Лялюк, О. Г. Ратушняк. — Вінниця: ВНТУ, 2024. — 90 с.
130. ДБН А.2.23:2014. Склад та зміст проектної документації на будівництво: [чинний від 2014-10-01]. — К.: Держспоживстандарт України, 2014. — 26 с.
131. Стороженко, Л. І. Конспект лекцій з дисципліни «Металеві конструкції» для студентів спец. 2903. Частина 1 / Л. І. Стороженко. — Полтава: ПолтНТУ, 1992. — 48 с.



Limited Liability Company

"Synergy RD"

49005, Dnipro, Gagarin ave., 61, Ukraine, e-mail: [synergyRD.UA@gmail.com](mailto:synergyRD.UA@gmail.com) Ph. +380509880849

«14» серпня 2024р.

м. Дніпро

### ДОВІДКА

про впровадження результатів наукових досліджень здобувача наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 Матеріалознавство

Козачко Валентина Іванівна на тему «Формування комплексу механічних властивостей низьковуглецевих мікролегованих сталей в залежності від товщини металопрокату»

У дисертаційному дослідженні здобувача Козачко В.І. на тему «Формування комплексу механічних властивостей низьковуглецевих мікролегованих сталей в залежності від товщини металопрокату» розроблено фізико-математичні моделі визначення взаємозв'язку між параметрами структури та ударною в'язкістю металопрокату. Для визначення впливу розподілу хімічного складу на ударну в'язкість з урахуванням товщини металопрокату було проведено комплекс досліджень, який містив елементи попарного кореляційного аналізу. Даний тип аналізу було застосовано з метою визначення наявності впливу кожного з елементів хімічного складу сталі на ударну в'язкість.

Підприємство відмічає, що запропоновані математичні моделі дозволяють оцінити сумісний вплив змінних на ударну в'язкість, відокремити хімічні елементи який мають істотний вплив на ударну в'язкість, а саме сульфідів і фосфідів.

Результати наукового дослідження Козачко Валентина Іванівна на тему «Формування комплексу механічних властивостей низьковуглецевих мікролегованих сталей в залежності від товщини металопрокату» на здобуття наукового ступеня доктора філософії по спеціальності 132 Матеріалознавство будуть використані будуть застосовані під час виконання подальших проєктних робіт ТОВ «Сінерджі Ер Енд Ді» у галузі матеріалів та мають практичний результат.

Засновник ТОВ «СРД»



«04» вересня 2024р.

м. Дніпро

### ДОВІДКА

про впровадження результатів наукових досліджень здобувача наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 132 Матеріалознавство Козечко Валентина Івановича на тему «Формування комплексу механічних властивостей низьковуглецевих мікролегованих сталей в залежності від товщини металопрокату»

У дисертаційному дослідженні здобувача Козечко В.І. на тему «Формування комплексу механічних властивостей низьковуглецевих мікролегованих сталей в залежності від товщини металопрокату» виконано модельний розрахунок використання елементів конструкції, виготовлених з металопрокату різної товщини та визначено область ефективного застосування даного підходу.

Аналіз отриманих результатів показав, що застосування металопрокату різної товщини дозволяє досягти зниження металоємності конструкції без втрати її несучої здатності, що є максимальним показником ефективності при проектуванні. Такий підхід дозволяє оптимізувати використання матеріалів, зменшуючи вагу конструкції, що сприяє зменшенню навантаження на основні вузли та забезпечує економію.

У дослідженні також відзначаються переваги використання високоміцних і високов'язких сталей марки 10Г2ФБ з високими товщинами елементів, що дозволяє досягти додаткової економії без зниження міцності конструкції. Завдяки такому підходу знизити вартість готового виробу на понад 20% у порівнянні з традиційними методами проектування та виготовлення, що є суттєвим результатом для зниження собівартості.

Цей підхід не тільки зменшує витрати на матеріали, а й знижує енергетичні витрати на виготовлення конструкцій та транспортування готової продукції за рахунок меншої ваги. Отже, застосування такого методу дозволяє підприємствам суттєво підвищити конкурентоспроможність продукції та досягти значного покращення фінансових показників, що є особливо актуальним в умовах сучасної економіки, де оптимізація витрат є фактором розвитку та стабільності.

Результати наукового дослідження Козечко Валентина Івановича на тему «Формування комплексу механічних властивостей низьковуглецевих мікролегованих сталей в залежності від товщини металопрокату» на здобуття наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 132 Матеріалознавство впроваджені на підприємстві при виготовленні металоконструкцій в товаристві з обмеженою відповідальністю «Катаріос Транс» м. Дніпро.

Директор



Олександр КУЗНЕЦОВ