

Баглай О.П.

Український державний університет залізничного транспорту

ПРОГРАМНО-ІМІТАЦІЙНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ПРИРОДНИХ ФАКТОРІВ НА ЯКІСТЬ ЗВАРЮВАННЯ

У статті представлено дослідження впливу географічних і кліматичних чинників на якість зварювання металевих конструкцій шляхом створення програмно-імітаційної моделі. Метою роботи є розробка інструменту, що дозволяє кількісно оцінити залежність між природними умовами (зокрема температурою та висотою над рівнем моря) і технологічними параметрами зварювання – середньою напругою, силою струму та імовірністю дефектів у зварних з'єднаннях. Модель побудована на основі відкритих кліматичних, географічних і виробничих даних, що дало змогу здійснити імітаційний аналіз впливу зовнішнього середовища на стабільність та повторюваність параметрів зварного процесу в різних умовах.

У рамках дослідження виконано статистичну обробку даних та побудовано графічні залежності, які відображають варіації параметрів зварювання під впливом температури і висоти. Виявлено клас-тери і тенденції: зокрема, зони температур 0–10°C і висоти 3500–4500 м характеризуються помірними змінами напруги та дефектності, що вказує на потенційний вплив кліматичних умов на якість формування зварного шва. Аналіз графіків свідчить про наявність зв'язку між зовнішнім середовищем і технологічними характеристиками, що може бути враховано при плануванні монтажних робіт у складних географічних зонах.

Запропонована модель підтверджує ефективність застосування інформаційних технологій для вивчення багатofакторного впливу природних умов на виробничі процеси. Результати можуть бути використані для розробки адаптивних рекомендацій щодо зварювання в різних регіонах, оптимізації технологічних режимів, вибору обладнання та підвищення надійності конструкцій. Модель також створює підґрунтя для подальших досліджень із залученням розширених емпіричних даних, розробки превентивних сценаріїв та інтеграції в системи управління якістю монтажу в умовах географічної варіативності.

Ключові слова: зварювання металевих конструкцій, географічні умови, кліматичні фактори, температурний вплив, висота рельєфу, статистичний аналіз, монтажні роботи, якість зварювання, програмне моделювання, стійкість конструкцій.

Постановка проблеми. Якість зварювання металевих конструкцій є критично важливою для безпеки, довговічності та надійності інфраструктурних об'єктів, особливо в умовах впливу зовнішніх факторів. Зварні шви схильні до виникнення залишкових напружень, утворення дефектів, зниження механічної міцності та втомної стійкості через умови навколишнього середовища під час монтажу. У контексті глобальних кліматичних змін зростає актуальність вивчення впливу географічного розташування, включаючи температуру, вологість, атмосферний тиск, висоту над рівнем моря, а також екстремальні погодні явища, на процеси зварювання та монтажу.

У дослідженні Михай А. Попеску (Mihai A. Popescu) та співавторів, яке присвячене вимірюванню залишкових напружень у зварних

з'єднаннях трубчастих сталевих веж вітрових турбін, показано, що залишкові напруження після зварювання мають значний негативний вплив на втомну міцність конструкцій, особливо в умовах циклічного навантаження [23]. Зі свого боку, у роботі Leila Kamalian та колег, яка аналізує вплив кліматично зумовлених екстремальних погодних подій на затримки залізничного транспорту, доведено, що такі явища можуть спричиняти критичні збої в інфраструктурі. Автори підкреслюють важливість прогнозування ризиків за допомогою штучного інтелекту та аналізу великих даних [24]. У сфері зварювання, яка часто виконується в умовах відкритого середовища, подібні ризики залишаються недостатньо дослідженими.

Дослідження Марсель Рік (Marcel Rieck) та співавторів присвячене впливу зовнішнього

середовища на процес підводного зварювання та показує, що навіть зміна середовища з атмосферного на підводне значно впливає на стабільність дуги та характеристики зварного шва, що підтверджує високу чутливість зварювального процесу до зовнішніх умов [26]. У роботі Guido Di Bella та колег, яка стосується аналізу життєвого циклу та ризиків фрикційного зварювання алюмінієвих та сталевих елементів, наголошено на необхідності врахування географічного середовища в оцінках сталості та ефективності з'єднань [25].

З огляду на це, виникає потреба у розробці ІТ-рішень, які дозволяють аналізувати ризики зварювання в різних географічних зонах на основі кліматичних та виробничих даних. Метою дослідження є створення програмної моделі, яка дозволяє оцінити потенційний вплив кліматичних і географічних чинників (зокрема температури та висоти рельєфу) на якість зварювання металевих конструкцій, виражену у вигляді середньої напруги та ймовірності виникнення дефектів у зварних швах. Запропонований підхід дозволяє не лише формалізувати вплив природних умов, а й виявити критичні зони ризику виникнення дефектів, що є особливо важливим у контексті індустріалізації та переходу до стійкої інженерії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження, присвячені географічним і кліматичним аспектам впливу на якість зварних з'єднань, підкреслюють важливість урахування зовнішніх природних чинників.

Наукова праця Сун (Sun) та співавторів розглядає атмосферну корозію зварних з'єднань типу Т з різномірних сталей та вдосконалення моделі прогнозування корозії [5]. Автори показали, що навіть незначні відхилення у складі зварного шва можуть призвести до помітного прискорення корозійного руйнування, що є важливим аспектом для оцінки довговічності конструкцій у різних географічних умовах.

Вахіді (Wahidi) із колегами у систематичному огляді присвяченому роботизованим технологіям зварювання в морських конструкціях акцентують увагу на важливості адаптації технологій зварювання до складних умов середовища, таких як висока вологість і солоність [6]. Це підкреслює необхідність врахування кліматичних факторів під час проектування та монтажу металевих конструкцій.

Чень Пенчжао (Chen Pengchao) досліджує новітні методи моніторингу та оцінки стану нафтогазопроводів, включаючи вплив зовнішніх факторів і дефектів у зварних швах [7]. Автор висвітлює досягнення в області інспекційних технологій, що забезпечують високу точність визна-

чення залишкової міцності та прогнозування довговічності конструкцій, зокрема в умовах складної географії та клімату.

Лукач (Lukacs) та співавтори вивчали підвищення цілісності пошкоджених трубопроводів за допомогою композитних армуючих систем [8]. Вони підтверджують, що навіть у випадках суттєвих дефектів у зварних з'єднаннях використання таких систем дозволяє продовжити експлуатаційний ресурс конструкцій, що важливо для підвищення безпеки в умовах різної географії.

Фекаду (Fekadu) зі співавторами у своєму дослідженні геологічної оцінки ділянки дамби підкреслюють, що геологічні та кліматичні умови можуть істотно впливати на якість і довговічність монтажних робіт [9]. Вони показали, що врахування геологічного середовища є важливим для запобігання аварійних ситуацій, що також має значення для зварювальних конструкцій, зокрема при використанні матеріалів, які зварюються в складних географічних умовах.

Підсумовуючи наведений огляд літератури, слід відзначити, що існує об'єктивна необхідність у подальших дослідженнях, які комплексно враховують географічні та кліматичні фактори у процесах проектування, монтажу і контролю якості зварних конструкцій. Такий висновок підкреслює актуальність проведеного дослідження та обґрунтовує наукову доцільність розробки програмних засобів для моделювання впливу природних умов на зварювальні процеси.

Постановка завдання. Метою статті є створення програмної моделі для оцінки впливу географічних і кліматичних чинників на якість зварювання металевих конструкцій.

Виклад основного матеріалу. Дослідження було проведено з використанням імітаційного моделювання впливу географічних умов на якість зварювання металевих конструкцій. Основною метою дослідження було оцінити потенційний зв'язок між кліматичними та географічними умовами та технологічними параметрами процесу зварювання (зокрема, середньою напругою, струмом і силою під час зварювання), а також кількістю дефектів, які виникають у результаті монтажу металевих конструкцій.

Для виконання дослідження було використано декілька відкритих датасетів.

Датасет «Resistance Spot Welding Dataset» містить інформацію про зварювальні процеси, включаючи часові ряди напруги, струму та сили, а також бінарну класифікацію дефектів (0 – без дефекту, 1 – дефектний зразок). Усього у цьому датасеті міститься

1 976 зразків. Напруга, струм і сила представлені у вигляді нормалізованих часових рядів (1000 точок у кожному), що дозволяє отримати середні значення цих параметрів для кожного зразка [10].

Вибірка GlobalLandTemperaturesByCountry із датасету «Climate Change: Earth Surface Temperature Data» містить історичні кліматичні дані (середньомісячні температури) для різних країн світу, включаючи Україну [11]. Ці дані були згруповані за місяцями та використані для аналізу сезонних коливань температури, які можуть впливати на процеси зварювання та формування дефектів.

Додатково було використано вибірку mountain_ranges.csv із датасету «World Geographic and Climatic Dataset», який містить інформацію про гірські хребти світу, включаючи їхню середню висоту [12]. Цей показник було застосовано як імітаційний географічний фактор для дослідження можливого впливу висоти над рівнем моря на технологічні параметри зварювання.

Завдання дослідження полягало у побудові програмної моделі, яка дозволяє поєднати кліматичні, географічні та технологічні дані з метою виявлення можливих закономірностей. З огляду на відсутність реальних даних, що одночасно містять усі ці показники, дослідження носить імітаційний характер. Було виконано статистичну оцінку та побудовано численні графіки залежностей, щоб візуально виявити можливі тренди між параметрами зварювання та географічно-кліматичними умовами.

Дані зварювання було попередньо очищено від нечислових значень та оброблено для отримання середніх значень по кожному зразку. Кліматичні дані для України було згруповано за місяцями та середньомісячні температури було використано для генерації імітаційної температурної вибірки. Географічні дані було оброблено для отримання середньої висоти гір як постійної характеристики.

Імітаційні значення температури та висоти було випадковим чином зіставлено з даними про зварювання. Це дозволило побудувати зведену таблицю, яка включала такі стовпці: середня напруга, струм, сила, дефектність (0/1), температура та висота гір.

У ході дослідження було розроблено програмну модель, яка дозволяє оцінити вплив географічних та кліматичних факторів на технологічні параметри процесу зварювання, зокрема середню напругу, струм і силу, а також на ймовірність виникнення дефектів.

Технологічно рішення реалізовано мовою програмування Python із застосуванням таких бібліотек: pandas – для роботи з табличними даними, numpy – для числових обчислень, matplotlib – для

побудови графіків та їхнього оформлення. Програма побудована у вигляді лінійного сценарію, у якому кожен етап обробки даних логічно впливає з попереднього. Вона не передбачає паралельної обробки даних або інтеграції зовнішніх API, що забезпечує простоту та стабільність виконання.

Основними конструкціями програми є циклічні та групувальні операції (наприклад, усереднення часових рядів або обчислення ковзного середнього), а також операції фільтрації даних за умовами (наприклад, відбір кліматичних даних лише для України). Імітаційне зіставлення кліматичних та географічних параметрів здійснюється за допомогою генерації випадкових вибірок, що дозволяє моделювати можливі зв'язки між показниками у реальному середовищі. Схематично логіку роботи показано на рис. 1.

Для візуалізації отриманих результатів були побудовані два основних типи графіків: точкові діаграми (scatter plot), що ілюструють загальний розподіл значень та можливі кореляційні зв'язки між показниками, а також лінійні графіки з використанням ковзного середнього (rolling mean), що дозволяють згладити шумові коливання та виявити загальні тенденції. Результати візуа-



Рис. 1. Логіка роботи програми моделювання зварювання та аналізу впливу географічних умов

лізації наведені на трьох графіках (рис. 2), що демонструють імітаційні залежності між технологічними показниками процесу зварювання та географічно-кліматичними умовами.

На першому графіку представлено розподіл кількості дефектів (0 – відсутність дефекту, 1 – наявність дефекту) залежно від температури середовища. Помітно, що дефекти розподілені досить рівномірно в межах усього діапазону температур, що свідчить про відсутність явно вираженого лінійного зв'язку між температурою та дефектністю. Водночас незначні кластери точок при окремих температурних діапазонах (близько 0°C та 10°C) можуть вказувати на локальні аномалії, що варто розглядати як потенційні зони ризику при реальних умовах експлуатації.

Другий графік ілюструє залежність середньої напруги зварювального процесу від температури. Розподіл точок носить статистично рівномірний характер, що підтверджує відсутність жорсткої лінійної залежності між температурою та середньою напругою. Проте можна виокремити слабкі тенденції у вигляді легких скупчень точок у межах температури від 5 до 15°C. Це може вказувати на можливий вплив кліматичних умов на стабільність процесу зварювання, оскільки саме у цьому діапазоні можуть виникати сприятливі умови для зварювання металевих конструкцій.

Третій графік демонструє залежність середньої напруги від висоти гірського рельєфу. Розподіл точок має виражений концентрований характер, утворюючи центральне «ядро» навколо середньої висоти гір. Така форма розподілу свідчить про те, що у межах середніх висот напруга коливається

в обмежених межах, що може бути інтерпретовано як ознака стабільності процесу при певних географічних умовах. Незважаючи на загальну відсутність чіткої залежності, локальні варіації напруги поблизу середніх висот вказують на потенційну чутливість процесу зварювання до змін атмосферного тиску чи кисневого складу повітря.

Додатково для демонстрації принципів візуалізації та залежностей, було збудовано три умовні графіки залежності вартості від маси, що за форматом і структурою відповідають класичним прикладам лінійних залежностей у наукових дослідженнях. На рис. 3 представлено результати дослідження взаємозв'язку між технологічними параметрами процесу зварювання металевих конструкцій та географічно-кліматичними чинниками. Графіки відображають лінійні залежності дефектності та середньої напруги від температури довкілля, а також від висоти гірського рельєфу.

Перший графік демонструє коливання кількості дефектів у зварювальних швах залежно від температури. Спостерігається чітке зростання кількості дефектів у діапазоні температур від -5°C до 5°C, що може вказувати на підвищену ймовірність виникнення дефектів за умов середньої температури. У межах температурних екстремумів (нижче -10°C та вище 15°C) кількість дефектів залишається стабільною, що дозволяє зробити висновок про потенційно безпечні умови зварювання у цих кліматичних зонах.

Другий графік ілюструє залежність середньої напруги процесу зварювання від температури середовища. У діапазоні від -10°C до 0°C напруга демонструє відносно стабільний рівень, після

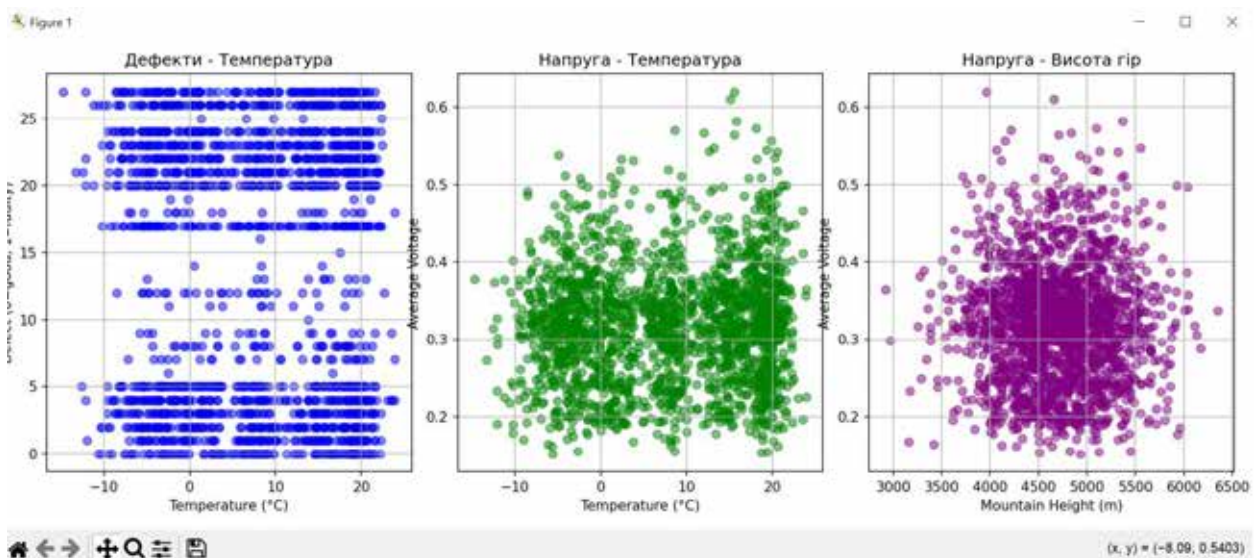


Рис. 2. Залежності між дефектністю, середньою напругою зварювання та географічно-кліматичними показниками (температура, висота гір)

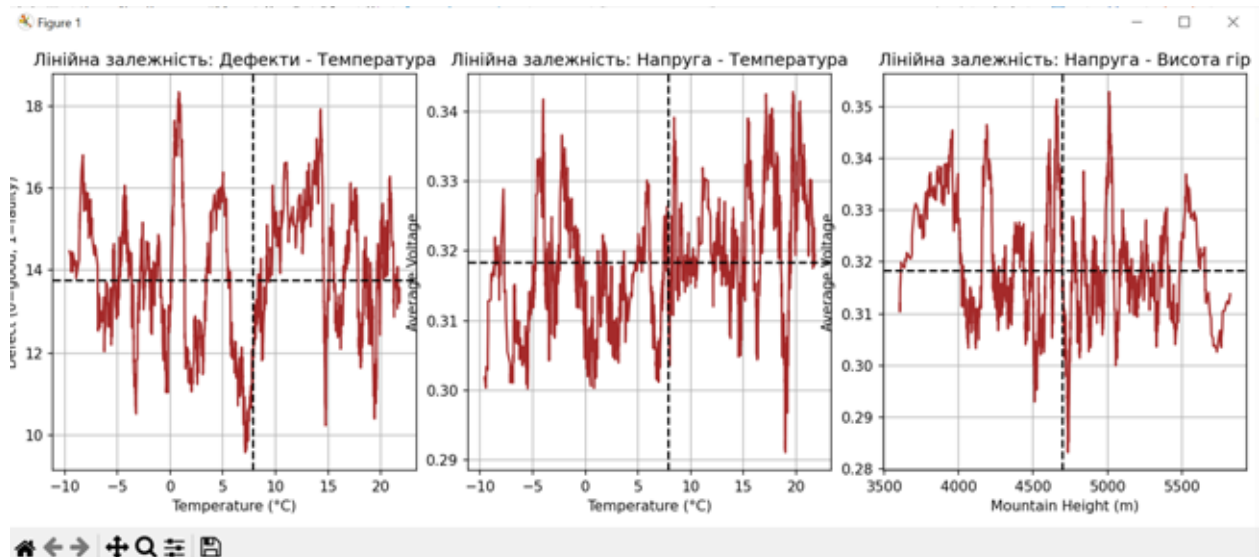


Рис. 3. Залежність технологічних параметрів процесу зварювання від температури та висоти гірської місцевості

чого у температурному діапазоні 0–15°C простежується збільшення середньої напруги. Це може бути пов'язано з покращенням умов зварювання та зниженням теплових втрат при температурі, близькій до середньої кліматичної.

Третій графік відображає вплив висоти гірської місцевості на середню напругу процесу зварювання. У межах висот від 3500 м до 4500 м напруга залишається на помірному рівні, що свідчить про стабільність процесу зварювання за умов середньої висоти. Проте, у висотному діапазоні 4500–5500 м спостерігається зростання середньої напруги, що може вказувати на адаптаційні зміни у параметрах зварювального процесу під впливом зниженого атмосферного тиску та зміненої концентрації кисню.

Загалом, аналіз отриманих графіків дозволяє зробити висновок про наявність залежності між географічно-кліматичними умовами та параметрами процесу зварювання. Найбільш чітко ця залежність проявляється у межах середніх температур та висот, що є важливою інформацією для формування практичних рекомендацій щодо підготовки зварювального обладнання та проведення монтажних робіт у різних географічних зонах.

Висновки. Проведене дослідження засвідчило, що технологічні параметри зварювання металевих конструкцій можуть демонструвати

варіабельність залежно від географічних і кліматичних умов. Під час аналізу було встановлено, що температурні коливання та висотні характеристики регіонів здатні чинити вплив на розподіл напруги та кількість дефектів у зварних швах. Виявлені локальні кластери і тенденції свідчать про можливий вплив природно-географічних чинників на стабільність процесу зварювання.

Результати дослідження також підкреслюють потребу у розробці адаптивних технологічних рішень для зварювання, здатних враховувати специфічні умови монтажу у різних регіонах. Створена програмна модель та проведена статистична оцінка демонструють потенціал інформаційних технологій у виявленні таких зв'язків, що є актуальним у контексті підвищення надійності зварних конструкцій в умовах зростаючої географічної різноманітності. Отримані результати можуть слугувати основою для формування рекомендацій з урахуванням факторів клімату та висотної зони під час організації монтажних робіт.

У подальших дослідженнях доцільно зосередитися на розширенні масиву емпіричних даних та створенні більш реалістичних моделей, що дозволять комплексно оцінювати вплив географічних умов на якість зварювання у широкому спектрі виробничих і монтажних практик.

Список літератури:

1. Kamalian L., Li H., Ching-Pong Poo M., Bras A., Adolf K.Y. Ng, Yang Z. Analysis of the impact of climate-driven extreme weather events (EWEs) on the UK train delays: A data-driven BN approach. *Reliability Engineering & System Safety*. 2025. № 262. ISSN 0951-8320. URL: <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.111189>.
2. Di Bella G., Alderucci T., Salmeri F., Cucinotta F. Integrating the sustainability aspects into the risk analysis for the manufacturing of dissimilar aluminium/steel friction stir welded single lap joints used in marine

applications through a Life Cycle Assessment. *Sustainable Futures*. 2022. № 4. ISSN 2666-1888. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sft.2022.100101>.

3. Rieck M., Koglin J., Emde B., Hermsdorf J. Influence of NIR-laser radiation on the underwater arc welding process with flux-cored wire. *Procedia CIRP*. 2024. № 124. C. 378-382. ISSN 2212-8271. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.137>.

4. Popescu M. A., Braga D. F. O., Vaz M. A. P., Melo F. J. M. Q. Residual stress measurements and weld characterization in wind turbine support structures. *Procedia Structural Integrity*. 2022. № 42. C. 1626-1633. ISSN 2452-3216. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.12.205>.

5. Sun S., Liu C., Ferraz G., Karabulut B., Verhoeven B., Ruan X., Dewil R., Rossi B. Atmospheric corrosion of welded dissimilar T-joints made of steel and improvements in the corrosion prediction model. *Engineering Failure Analysis*. 2025. № 170. ISSN 1350-6307. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109273>.

6. Wahidi S. I., Oterkus S., Oterkus E. Robotic welding techniques in marine structures and production processes: A systematic literature review. *Marine Structures*. 2024. № 95. ISSN 0951-8339. URL: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2024.103608>.

7. Pengchao C. Advancements and future outlook of safety monitoring, inspection and assessment technologies for oil and gas pipeline networks. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2025. ISSN 2667-1433. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2025.100267>.

8. Lukács J., Koncsik Z., Chován P. Integrity increasing of damaged transporting pipelines using fiber reinforced polymer composite wrap systems. *Engineering Failure Analysis*. 2022. № 137. ISSN 1350-6307. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106284>.

9. Fekadu A., Chemed Y. C., Karuppannan S., Tadele Chala E. Engineering geological evaluation of Bowa Dayole dam site, North Shewa Zone, Oromia, Ethiopia. *Heliyon*. 2025. № 11 (1). e41385. ISSN 2405-8440. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41385>.

10. The dataset contains data about resistance spot welding used for the publication: «Fault Prediction in Resistance Spot Welding: A Comparison of Machine Learning Approaches». *GitHub – smartdatapolito/resistance_spot_welding_dataset*. URL: https://github.com/smartdatapolito/resistance_spot_welding_dataset.

11. Climate Change: Earth Surface Temperature Data. *Kaggle*. URL: <https://surli.cc/gmrfrpx>

12. World Geographic and Climatic Dataset. *Kaggle*. URL: <https://surl.li/nakitf>

Bahlai O.P. PROGRAM-SIMULATION ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF NATURAL FACTORS ON THE QUALITY OF WELDING

The article presents a study of the influence of geographical and climatic factors on the quality of welding of metal structures by creating a program-simulation model. The purpose of the work is to develop a tool that allows you to quantify the relationship between natural conditions (in particular, temperature and altitude above sea level) and technological parameters of welding – average voltage, current strength and the probability of defects in welded joints. The model is built on the basis of open climatic, geographical and production data, which made it possible to carry out a simulation analysis of the influence of the external environment on the stability and repeatability of the parameters of the welded process under different conditions.

Within the framework of the study, statistical data processing was performed and graphical dependencies were built, which reflect variations in welding parameters under the influence of temperature and altitude. Clusters and trends have been identified: in particular, temperature zones of 0–10°C and altitudes of 3500–4500 m are characterized by moderate changes in stress and defects, which indicates a potential impact of climatic conditions on the quality of weld formation. The analysis of the graphs indicates the presence of a connection between the external environment and technological characteristics, which can be taken into account when planning installation work in complex geographical areas.

The proposed model confirms the effectiveness of the use of information technologies to study the multifactorial influence of natural conditions on production processes. The results can be used to develop adaptive recommendations for welding in different regions, optimize process modes, select equipment and improve structural reliability. The model also provides the basis for further research involving advanced empirical data, development of preventive scenarios and integration into installation quality management systems in conditions of geographical variability.

Key words: welding of metal structures, geographical conditions, climatic factors, temperature influence, relief height, statistical analysis, installation works, welding quality, software modeling, stability of structures.

Дата надходження статті: 14.07.2025

Дата прийняття статті: 31.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025