

Д.В. БРЕСЛАВСЬКИЙ, М.О. ГРОШЕВИЙ, О.А. ТАТАРИНОВА, А.В. СЕНЬКО

АЛГОРИТМИ ТА ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ ДЛЯ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ СТРУКТУРИ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ З МЕТОЮ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЗУЧОСТІ

Стаття містить опис підходу, алгоритмів та програмного засобу для аналізу зображень деформованих структур матеріалів. Розроблений підхід побудовано на виділенні при аналізі мікроструктури матеріалу важливих факторів, що впливають на високотемпературне деформування при повзучості у жароміцному нікелевому сплаві, а саме розмірів каналів та їхньої орієнтації. Розроблений програмний засіб використовує алгоритми перетворення зображень у бінарні чорно-білі за допомогою методу Отсу. Інтенсивність градієнту в кожній точці зображення візуалізується з використанням оператора Собеля. Границі фрагментів визначаються за допомогою детектора країв Кенні. Відрізки прямих ліній знаходяться з використанням перетворення Гафа. Програмний засіб реалізовано на мові програмування Python з застосуванням бібліотеки OpenCV. Описано основні складові частини та надано блок-схему програми. З застосуванням розробленого програмного забезпечення виконано перетворення відомих експериментально отриманих зображень деформованих при температурі 1273K та широкому діапазоні напружень структур зразків з жароміцного нікелевого сплаву CMSX-4 у різні моменти часу. Обговорюються результати аналізу розмірів каналів γ -фази у сплаві за допомогою кількісного оцінювання перетворених бінарних зображень. Знайдені характеристики були поставлені у відповідність до значення швидкості деформацій повзучості, що була визначена розрахунковим шляхом за відомими експериментальними даними. Показано можливість визначення переходу від ділянки встановленої повзучості до етапу лавиноподібного зростання деформацій та прихованих пошкоджень. Для розглянутого прикладу проведено визначення розташування каналів у представницькому зображенні. Запропоновано методику корегування кривих повзучості з залученням даних обробки зображень структури матеріалу.

Ключові слова: програмний засіб, обробка зображень, бінарні зображення, структури матеріалу, повзучість, пошкоджуваність.

The paper contains a description of the approach, algorithms, and software tool for image analysis of deformed material structures. The developed approach is based on the analysis of the microstructure of the material to identify important factors that affect high-temperature deformation during creep in a heat-resistant nickel-based alloy, namely, the dimensions of the channels and their orientation. The developed software tool uses algorithms for converting images into binary black and white using the Otsu method. The intensity of the gradient at each point of the image is visualized using the Sobel operator. Fragment boundaries are determined using the Canny edge detector. Straight line segments are found using the Hough transformation. The software tool is implemented in the Python programming language using the OpenCV library. The main components are described and a flow chart of the program is provided. With the use of the developed software, the transformation of the known experimentally obtained images of the structures of the specimens from heat-resistant nickel-based alloy CMSX-4 deformed at a temperature of 1273K and in a wide range of stresses at different time moments was performed. The results of the analysis of the dimensions of the γ -phase channels in the alloy using quantitative evaluation of transformed binary images are discussed. The found characteristics were matched to the value of the creep strain rate, which was determined by calculation based on known experimental data. The possibility of determining the transition from the secondary creep to the stage of avalanche-like growth of strains and hidden damage is shown. For the considered example, the location of the channels in the representative image was determined. A technique for correcting creep curves with the involvement of material structure image processing data is proposed.

Key words: software, image processing, binary images, material structures, creep, damage.

Вступ.

Класичну механіку деформівного твердого тіла було побудовано на базі використання рівнянь стану, значення фізичних констант до яких визначались за даними проведених на макроскопічному рівні експериментальних випробувань [1, 2]. Під терміном «дослідження на макроскопічному рівні» розуміють, що зразки для експериментів мають розміри порядку сантиметрів, самі ж випробування проводять на спеціальному експериментальному обладнанні з вимірюванням їхніх переміщень. Такі підходи є характерними для отримання діаграм деформування та кривих повзучості [1, 2]. Після визначення таких експериментальних даних їхньою обробкою розрахунковим шляхом знаходились значення констант, що входять до визначальних рівнянь.

Між іншим, велику інформацію щодо деформівної поведінки та характеристик накопичення прихованої пошкоджуваності можуть надати матеріалознавчі дослідження, що виконуються на так званому мезо- рівні (структура металів) та мікроскопічному (молекулярному або атомному) рівні. Головною проблемою в цьому була відсутність можливості побудувати функціональні залежності між потрібними характеристиками на макро- та мікро- або мезо- рівнях. В останні роки почали з'являться роботи, в яких подібні залежності формуються (див. наприклад [3-7]).

Б.Ф.Дайсоном та М.Мак-Ліном [3] створено рівняння стану повзучості з урахуванням розвитку трьох типів мікроструктурної нестабільності (дислокація, кавітація частинок і меж зерен) для суперсплаву на основі нікелю IN738LC. В роботах [4, 5] запропоновано ефективний підхід до формулювання рівнянь стану для задач механіки суцільного середовища з використанням даних експериментів з аналізу структури матеріалу протягом експлуатації ядерних реакторів. Вплив водню на кінематику, термодинаміку та кінетику еволюції незворотних деформацій та пошкодження отримано на основі запропонованих рівнянь в'язкопластичності континууму Баммана та пошкодження Хорстемейера. В роботах Х.Альтенбаха, К.Науменка зі співавторами [6, 7] побудовані мікро-макро моделі використано для аналізу нелінійного деформування при високих температурах.

Для описаного аналізу є необхідною обробка фотографічних зображень структури матеріалу, отриманої, завдяки, наприклад, використанню електронного мікроскопу. Без належної автоматизації така робота є досить складною та може призводити до певних неточностей. У зв'язку з цим для виконання аналізу структури матеріалу було запропоновано використання методології обробки зображень [8-11]. Використання спеціального програмного забезпечення дозволяє проводити необхідні дії з перетворення

растрових зображень, виділення важливих його елементів та формування якісних та кількісних висновків.

Дану статтю присвячено опису підходу, алгоритмів та програмного засобу для розв'язання задачі аналізу мікроструктурних зображень одного зі сплавів з метою визначення або уточнення характеристик його повзучості.

Опис підходу, алгоритмів та програми.

На даному етапі розглянемо підхід та його реалізацію в задачі визначення характеристик повзучості на прикладі аналізу результатів експериментального дослідження деформування жароміцного нікелевого сплаву CMSX-4 [12, 13]. У роботі [12] виконано аналіз мікроструктури даного сплаву та встановлено кореляцію між швидкістю деформацій повзучості та товщиною каналу γ -фази у матеріалі. Отримані результати були використані для аналізу достовірності роботи розробленого методу аналізу зображень та програмного засобу, створеного на його основі.

Розглянемо основні етапи роботи. Для проведення аналізу було запропоновано наступну послідовність дій. Після завантаження файлу з зображенням проводиться перетворення отриманого масиву точок, що описує растрове зображення, у бінарний формат з використанням тільки чорного та білого кольорів. Далі необхідно класифікувати кожний піксель як "чорний" або "білий" за його інтенсивністю. Для зображення будується його гістограма.

За допомогою методу Отцу [14] знайдемо порогове значення і розділимо усі пікселі на "чорні" та "білі". Приклад результатів процесу розподілення представлено на рис. 1. Після перетворення будується нове, вже бінарне зображення.

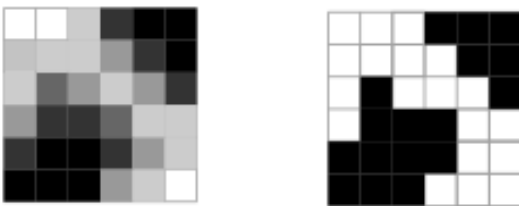


Рисунок 1 – Початковий вигляд зображення та перетворене бінарне зображення

Використаємо даний підхід для перетворення типового зображення мікроструктури матеріалу. Спочатку, на основі зображення, формується гістограма розподілу інтенсивності пікселів. Використовуючи метод Отцу, на цій гістограмі визначається оптимальне порогове значення (рис.2).

Подальше використання встановленого порогового значення дозволяє класифікувати кожен піксель зображення як чорний або білий, в результаті чого формується бінарне зображення, представлене на рисунку 3.

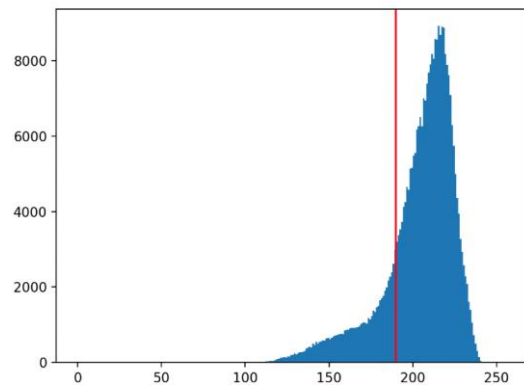


Рисунок 2 – Гістограма розподілу з відміченим пороговим значенням.



Рисунок 3 – Бінарне зображення структури матеріалу, отримане після перетворення.

Після отримання нового масиву точок з їхнім бінарним розподілом отримується можливість класифікації зображення за певним критерієм. Це дозволяє ефективно розділити різні області зображення, зокрема відрізнити структурні елементи матеріалу, що має ключове значення для подальшого аналізу його властивостей.

Тепер розглянемо основні етапи визначення розмірів γ -фази на зображенні структури сплаву. Формалізуємо її як задачу визначення країв розподілу та ліній різної інтенсивності на зображенні. Для цього спочатку з використанням оператора Собеля [15] візуалізуємо інтенсивність градієнту в кожній точці зображення.

Використаємо підхід з проходом у двох перпендикулярних напрямках, що відповідають напрямкам осей декартової системи координат (абсциса X у горизонтальному напрямку, ордината Y у вертикальному). Розглядається фрагмент зображення, аналізується різка зміна інтенсивності пікселів. Далі визначається перша похідна функції яскравості для точного визначення швидкості зміни інтенсивності градієнту, що сприяє ефективному виявленню та аналізу текстурних особливостей і геометричних властивостей на зображенні.

Даний алгоритм використано на зображеннях, що наведено у роботі [13] та які демонструють різні

розподіли характеристик структури у часі впродовж деформування при повзучості. Застосуємо алгоритм окремо у напрямках координатних осей. Як приклад, на рис. 4 наведемо результат його роботи за напрямком осі Y.

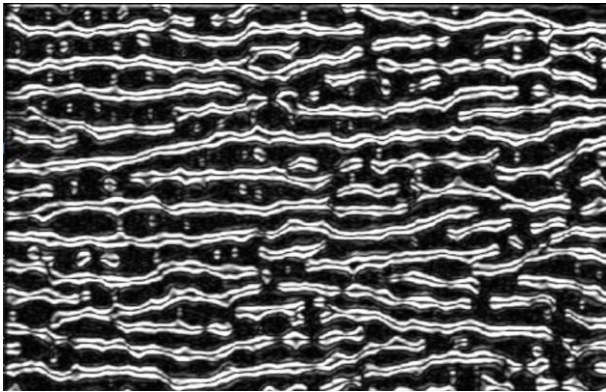


Рисунок 4 – Інтенсивність градієнту за напрямком осі Y

Далі необхідно використати детектор країв Кенні [16]. Алгоритм дій полягає у наступному. Задаються порогові значення градієнту. Будь-які пікселі зі значенням градієнту, що перевищує значення $maxVal$, враховуються, а пікселі, зі значенням градієнту, що є нижчими за $minVal$, відкидаються. Пікселі, котрі лежать між цими двома порогами, класифікуються на основі їх зв'язності. Якщо вони з'єднані з пікселями, які мають інтенсивність градієнту вищу за $maxVal$, вони вважаються частиною країв. В іншому випадку відкидаються. Ця методологія забезпечує точність виявлення країв, мінімізуючи вплив шуму та неточностей. Основну схему використання алгоритму надано на рис. 5.

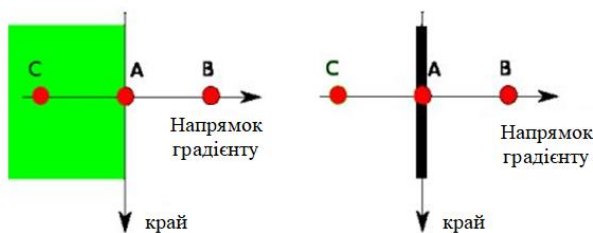


Рисунок 5 – Схема визначення країв за допомогою детектора країв Кенні

Після використання описаного алгоритму зображення, що обробляється, перетворюється на наступне. Його представлено на рис. 6.

Черговим кроком є визначення прямих ліній з використанням перетворення Гафа [17]. Кожна точка на зображенні репрезентується у просторі параметрів, використовуючи полярну систему координат. Аналіз полягає у виявленні перетинів синусоїд в цій системі. Застосування порогу виявлення дозволяє ефективно розрізнити значущі лінії від шуму. Цей механізм гарантує, що лінії з високою концентрацією точок у полярному просторі параметрів ідентифікуються як релевантні, тим самим оптимізуючи точність виявлення прямих ліній на зображенні. В результаті

формується двовимірний масив, кожен елемент якого має значення, що дорівнює сумі точок або пікселів, розташованих на прямій, поданій полярними координатами. При цьому елемент з максимальним значенням визначить шукану пряму. Результат роботи алгоритму з наведеними відрізками прямих представлено на рис. 7. Відмітемо, що незважаючи на неповне визначення каналів алгоритмом, їхня кількість корелює з кількістю прямих ліній, визначених на зображенні.

Описаний алгоритм реалізовано у вигляді програми на мові Python з використанням бібліотеки OpenCV [18]. Програма автоматично визначає кількість темних і світлих пікселів у зображенні, перетвореному в градації сірого. Спочатку відбувається зчитування значень пікселів растрового зображення, шлях до якого передається через аргумент командного рядку. Після зчитування застосовується бінарне порогове перетворення, використовуючи метод Отцу для розділення пікселів на темні та світлі. Підраховується загальна кількість пікселів у зображенні, кількість світлих пікселів (пікселів, що перевищують порогове значення), та обчислюється відсоток темних пікселів від загальної кількості. Видається необхідна інформація, включаючи значення встановленого порогу, загальної кількості пікселів, кількості світлих і темних пікселів, а також відсоток темних пікселів. Інформація виводиться до консолі, а бінарне зображення відображається на екрані. Основну блок-схему програми представлено на рис.8.

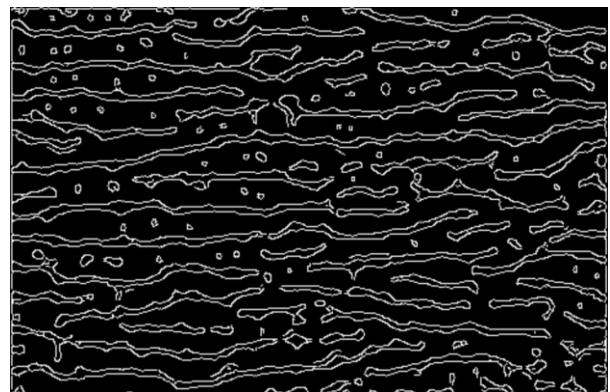


Рисунок 6 – Поточний вигляд зображення після роботи алгоритму виявлення країв

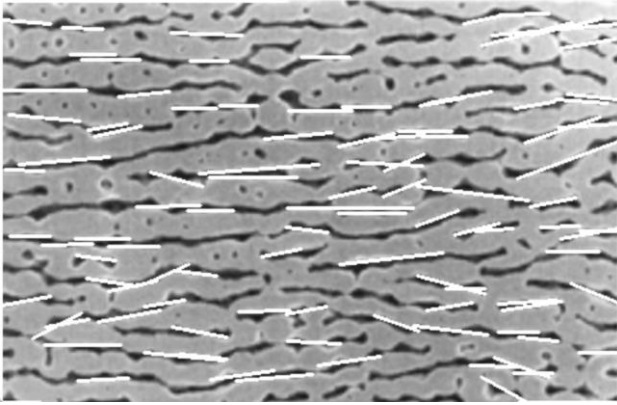


Рисунок 7 – Зображення зі знайденими відрізками прямих

Тестування та перевірка програми з використанням файлів з відомим значенням розподілів інтенсивності зображення показало цілком задовільну її працездатність.

Методика визначення відповідності характеристик зображення та швидкості деформацій повзучості

Розроблену програму було використано для продовження комплексної перевірки її працездатності на прикладі низки зображень структури жароміцного сплаву CMSX-4, наведених у роботі [12] та описаних у роботі [13]. У цій статті міститься як інформація щодо кривих повзучості, діаграм «швидкість деформації повзучості – деформація повзучості» й інших даних, отриманих при температурі 1273 K та різних значеннях напружень розтягу, так й надано зображення структури сплаву при деформуванні у різні моменти часу. Авторами [12, 13] наголошується, що за результатами виконаних досліджень встановлену кореляцію між розмірами каналів γ - фази та швидкістю деформацій повзучості.

Даний сплав відрізняється тим, що рівень отриманих на першій та другій ділянці кривих повзучості є досить незначним, а основне зростання деформацій має місце на третій, прискореній ділянці, що передусє руйнуванню.

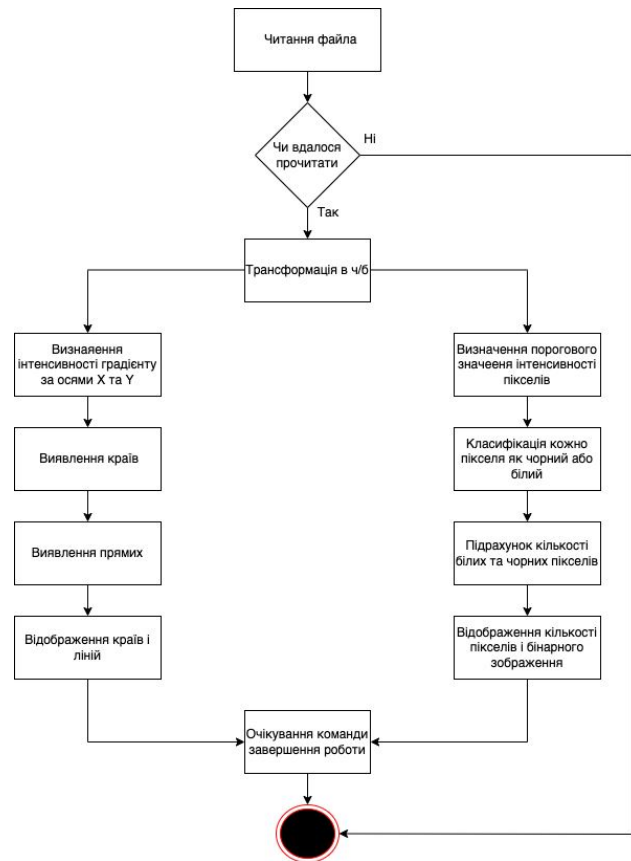


Рисунок 8 – Блок-схема програми для аналізу структури матеріалу

За допомогою даних, що наведені у роботі [12], було проведена обробка описаних залежностей (деформація повзучості від часу, швидкість деформації повзучості від саме деформації повзучості) у діапазоні напружень 100 – 400 МПа та знайдені значення констант, що входять до визначальних рівнянь. У зв'язку з наявністю всіх трьох ділянок повзучості до використання було залучено рівняння, що використовує гіпотезу зміцнення [1, 2]. Залучено еволюційне рівняння для скалярного параметру пошкоджуваності ω [1, 2]:

$$\dot{c} c^\alpha = B \frac{\sigma^n}{(1-\omega)^m} \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = D \frac{\sigma^m}{(1-\omega)^m}, \quad \omega(0)=0, \quad \omega(t^*)=1, \quad (2)$$

де c – деформація повзучості,

σ – напруження,

t^* – час завершення руйнування зразку,

B, D, n, m, α – константи, що визначаються після обробки експериментальних даних.

Отримано наступні їхні значення: $B=4.26 \cdot 10^{-18}$ МПа⁻ⁿ/с, $n=3.04$, $\alpha=0.4$, $D=9.5 \cdot 10^{-20}$ МПа^{-m}/с, $m=5.22$. Побудовані криві повзучості для різних інтервалів часу представлено на рис. 9 та 10. Менший інтервал (рис.9) було обрано для того, щоб відобразити криві повзучості на перших двох ділянках. Загальний вигляд

кривих повзучості представлено на рис. 10. На рисунках 9 та 10 крива 1 відповідає навантаженню 250 МПа, крива 2 – 160 МПа, крива 3 100 МПа.

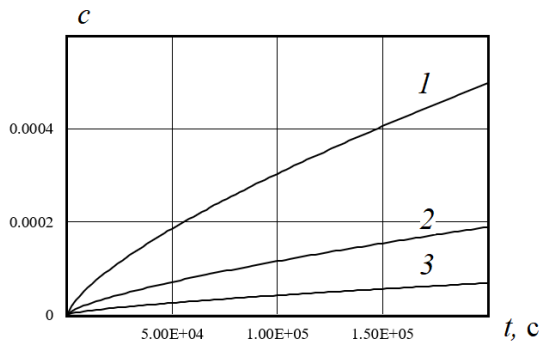


Рисунок 9 – Криві повзучості. Перша та друга ділянка

Використаємо алгоритм обробки зображень, реалізований у розробленій програмі, для аналізу змін у структурі сплаву при повзучості. У роботі [12] наведено структури для трьох моментів часу повзучості та після руйнування. Такі зображення структур є типовими та тому можуть вважатись представницькими. Отже, аналіз буде проводитись для повних зображень, що містяться у роботі [12].

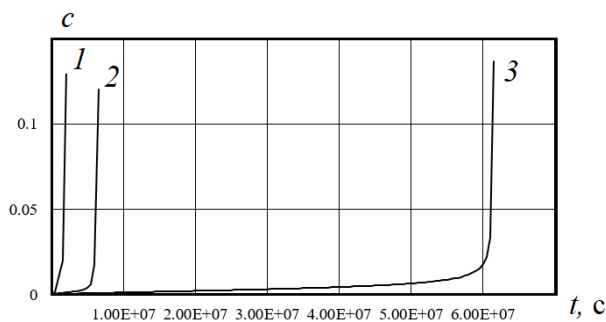


Рисунок 10 – Криві повзучості. Загальний вигляд

Залучимо гіпотезу, яку є найлегше використати при аналізі. Вважатимемо, що поточну ширину каналів можливо поставити у відповідність з наявністю відсотку чорних або білих пікселів на зображеннях (для бінарного зображення не має значення). Далі оперуємо зі значеннями для білих пікселів. Для відомих трьох моментів часу $t_1=3.6 \cdot 10^4$ с, $t_2=2.52 \cdot 10^5$ с, $t_3=3.24 \cdot 10^5$ с при навантаженні 250 МПа було проведено обробку зображень. Як приклад, наведемо результати роботи програми для моменту t_2 . Їх наведено на рис. 11.

Робота програми для трьох моментів часу визначила відсотковий вміст пікселів білого кольору у відповідних зображеннях структури. Для моменту t_1 це значення 84 %, для t_2 82 %, для t_3 78 %. Похибку в даному випадку визначено у 2%.

Розглянемо криву повзучості, побудовану для значення напруження розтягу 250 МПа для часового діапазону, що відповідає значенням $t_1 - t_2$. Її представлено на рис. 12. Згідно з обчисленнями за

співвідношеннями (1), (2) швидкість деформації повзучості на ділянці $t_1 - t_2$, яка є ділянкою встановленої повзучості, є постійною та складає $2.6 \cdot 10^{-9}$ с⁻¹. Відсотковий вміст білого кольору тут є практично однаковим та складає 84 % та 82 %. Цей факт може вказати на кореляцію між даними значеннями та швидкістю деформацій повзучості. При значення часу t_3 отримуємо менше значення вмісту. Як можна бачити з рис. 12, цей час вже відноситься до початку третьої ділянки, на якій починається зростання деформацій. Змасштабовані з коефіцієнтом $2.14 \cdot 10^{-6}$ значення деформацій, вираховані за результатами обробки бінарних зображень, наведено на рис. 12 окремими точками для трьох моментів часу, що розглядаються.

Як додатковий параметр оцінювання можливо залучити значення кількості горизонтальних відрізків. Справа у тому, що при деформуванні, як показано у роботі [12], канали у структурі з тих, що мають два взаємно перпендикулярних напрями, перетворюються на такі, що йдуть у напрямку, що відповідає горизонтальному. У момент, що передє руйнуванням, структура має вигляд, наведений на рис. 13. Таким чином, виникає додатковий параметр, який можливо формалізувати як кількість визначених алгоритмом відрізків прямих (наведено на рис. 7). Так, наприклад, для моменту руйнування, структуру для якого представлено на рис. 7, їхня кількість складає 95.

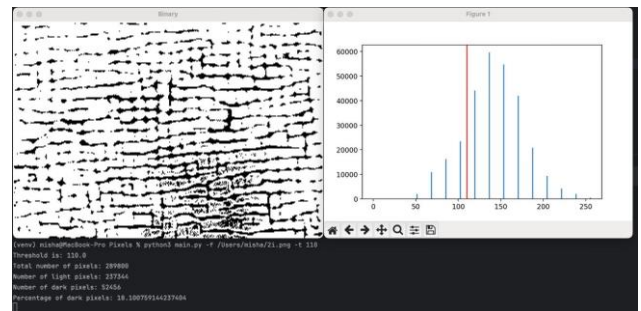


Рисунок 11 – Результат роботи програми перетворення зображення структури для випадку часу деформування $t_2=2.52 \cdot 10^5$ с. Навантаження розтягу 250 МПа.

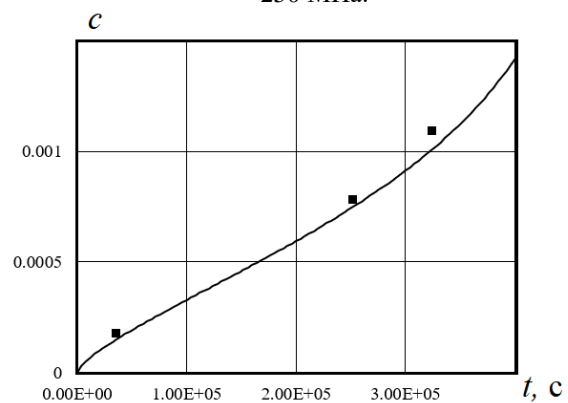


Рисунок 12 – Крива повзучості при значенні напруження розтягу 250 МПа, точки побудовано за даними обробки зображень структури

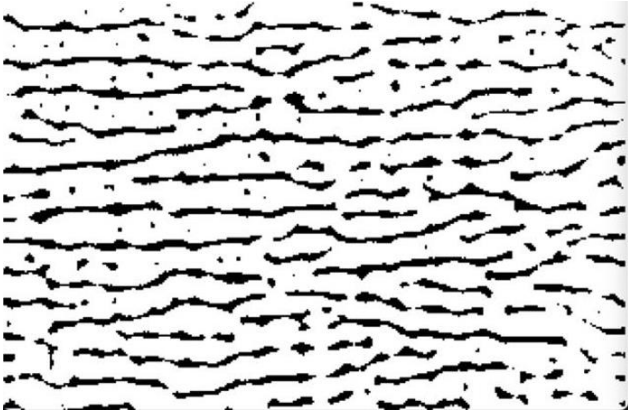


Рисунок 13 – Структура сплаву у момент, що передувє руйнуванню

Висновки.

Дана стаття містить опис підходу, алгоритмів та програмного засобу для аналізу зображень деформованих структур матеріалів. Підхід побудовано на виділенні важливих факторів, що впливають на високотемпературне деформування при повзучості у жароміцному нікелевому сплавї. Серед таких чинників розглянуто розміри каналів та їхня орієнтація. З застосуванням розробленого програмного забезпечення виконано перетворення зображень деформованих структур сплаву у різні моменти часу. Це дозволило запровадити кількісний аналіз представницьких елементів. Знайдені характеристики були поставлені у відповідність до значення швидкості деформацій повзучості, що була визначена розрахунковим шляхом за відомими експериментальними даними. Показана можливість аналізу кривих повзучості з залученням даних обробки зображень структури матеріалу.

Дана методика може розглядатись як корисна у практичних застосуваннях. Реально експерименти з повзучості зразків проводять на обмеженій часовій базї. Між іншим, довготривале деформування та пов'язане з ним накопичення прихованих пошкоджень можуть мати важливі особливості, що не відтворюються даними експериментів на малих часових базах [1]. Якщо є наявною структура матеріалу після тривалої експлуатації, то за її аналізом є можливим скорегувати або виправити рівняння стану. Це, як показано в роботі, в першу чергу стосується аналізу ділянки встановленої повзучості. Але й перехід до стадії лавиноподібного накопичення пошкоджень може бути визначеним. Також з застосуванням даної програми є можливим встановити залежності на момент руйнування зразку з використанням аналізу розташування каналів у сплавах такого типу, що розглянуто у роботі.

Виконаний аналіз властивостей швидкості деформацій повзучості на прикладі деформування при повзучості жароміцного сплаву CMSX-4 є лише прикладом демонстрації можливостей роботи розробленої програми. Наявність обмеженої кількості зображень структури не надає можливості достатньо обґрунтованих висновків та кількісних оцінок. Є

зрозумілим, що розроблений алгоритм та програму у цілому є необхідним перевірити на більшій кількості експериментальних даних.

Подяка. Ця робота була частково підтримана (Д.В. Бреславський) Фондом Фольксваген "Visiting research program for refugee Ukrainian scientists" (Az. 9D257).

Список літератури

1. Lemaitre J. Mechanics of solid materials./ J. Lemaitre, J.L. Chaboche // Cambridge: University press, 1994. – 556 p.
2. Rabotnov Yu.N. Creep Problems in Structural Members. / Yu.N. Rabotnov // Amsterdam/London: North-Holland Publishing, 1969. – 822 p.
3. Dyson B.F. Micromechanism-quantification for creep constitutive equations. IUTAM Symposium on Creep in Structures / B.F. Dyson, M. McLean Ed.: S. Murakami, N. Ohno. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. – P. 3–16.
4. Horstemeyer M.F. Modeling stress state dependent damage evolution in a cast Al–Si–Mg aluminum alloy / M.F. Horstemeyer // Theoretical and applied fracture mechanics. 2000, v.33, issue 1. – p. 31–47
5. Chandler M.Q. A continuum model for hydrogen-assisted void nucleation in ductile materials. / Chandler M.Q., Bammann D.J., Horstemeyer M.F //Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2013, v. 21, issue 5. – p. 055028.
6. Naumenko K. Constitutive Models / K. Naumenko, H. Altenbach // Modeling High Temperature Materials Behavior for Structural Analysis: Part I: Continuum Mechanics Foundations and Constitutive Models. – 2016. – C. 173-282.
7. Ozhoga-Maslovskaja O. Micromechanical simulation of grain boundary cavitation in copper considering non-proportional loading. / O.Ozhoga-Maslovskaja, K. Naumenko, H. Altenbach, O. Prygorniev // Computational Materials Science, Volume 96, Part A, 2015. – p. 178–184.
8. Acharya T. Image processing: principles and applications. / T. Acharya, A.K. Ray – John Wiley & Sons, 2005.
9. Davies E.R. Computer vision: principles, algorithms, applications, learning. / E.R. Davies – Academic Press, 2017.
10. Shih F. Y. Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques. / F.Y. Shih – John Wiley & Sons, 2010.
11. Chen C.H. (ed.). Handbook of pattern recognition and computer vision. / C.H. Chen – World scientific, 2015.
12. Miura N. Relation between Creep Rate during Accelerating Creep Stage and γ Channel Thickness in Single Crystal Nickel-based Superalloy, CMSX-4. / N Miura, Y. Kondo, T. Matsu. //Tetsu-to-hagané 89(12), 2003. – p.1240–1247.
13. Hiraguchi H. A Novel Simulation Method for Phase Transition of Single Crystal Ni based Superalloys in Elevated Temperature Creep Regions via Discrete Cosine Transform and Maximum Entropy Method. In "Creep in Structures VI", Holm Altenbach, Konstantin Naumenko eds. / H. Hiraguchi // Advanced Structured Materials, 194 Springer, 2023. – P. 151-160.
14. Bangare S.L. Method For Image Thresholding. / Sunil L. Bangare, Amruta Dubal, Pallavi S. Bangare, S.T. Patil, Reviewing Otsu's // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Volume 10, Number 9. – pp. 21777-21783
15. Chethan K.S. Analysis of Image Quality using Sobel Filter. / K.S. Chethan, G.S. Sinchana, K.R. Nataraj, A.L. Choodarathnakara // Conference: Third International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC). 2019. – P. 526-531.
16. Touka Hafsia Algorithm for Different Blurred and Noisy Images" / Touka Hafsia, Asma Belhaj, Hatem Tlijani, Khaled Nouri //2022 IEEE 21st international Cnference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA). – 2022. – p.342-349
17. Duda, R. O. Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures/ R.O. Duda, Hart P.E. // Comm. ACM, Vol. 15. 1972. – p. 11–15
18. Guobo Xie Image Edge Detection Based On Opencv/ Guobo Xie, Wen Lu // International Journal of Electronics and Electrical Engineering, Vol. 1, No. 2. – 2013. – p. 104-106

References (transliterated)

1. Lemaitre J. , Chaboche J.L. *Mechanics of solid materials*. Cambridge: University press, 1994. – 556 p.
2. Rabotnov Yu. N. *Creep Problems in Structural Members*.– Amsterdam/London: North-Holland Publishing, 1969. – 822 p.
3. Dyson B.F., McLean M. Micromechanism-quantification for creep constitutive equations. IUTAM Symposium on Creep in Structures / Ed.: S. Murakami, N. Ohno. Dordrecht: *Kluwer Academic Publishers*, 2001. P. 3–16.
4. M.F. Horstemeyer et al. Modeling stress state dependent damage evolution in a cast Al–Si–Mg aluminum alloy // *Theoretical and applied fracture mechanics*. 2000, v.33, issue 1, p. 31-47
5. M. Q. Chandler, D.J .Bammann, M.F .Horstemeyer. A continuum model for hydrogen-assisted void nucleation in ductile materials // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2013, v. 21, issue 5, p. 055028.
6. Naumenko K., Altenbach H. Constitutive Models // *Modeling High Temperature Materials Behavior for Structural Analysis: Part I: Continuum Mechanics Foundations and Constitutive Models*. – 2016. – C. 173-282.
7. Oksana Ozhoga-Maslovskaja, Konstantin Naumenko, Holm Altenbach, Oleksandr Prygorniev. Micromechanical simulation of grain boundary cavitation in copper considering non-proportional loading, *Computational Materials Science*, Volume 96, Part A, 2015, Pages 178-184.
8. Acharya T., Ray A. K. *Image processing: principles and applications*. – John Wiley & Sons, 2005.
9. Davies E. R. *Computer vision: principles, algorithms, applications, learning*. – Academic Press, 2017.
10. Shih F. Y. *Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques*. – John Wiley & Sons, 2010.
11. Chen C. H. (ed.). *Handbook of pattern recognition and computer vision*. – World scientific, 2015.
12. N Miura, Y. Kondo, T. Matsu. Relation between Creep Rate during Accelerating Creep Stage and γ Channel Thickness in Single Crystal Nickel-based Superalloy, CMSX-4. *Tetsu-to-hagané* 89(12), 2003. - p.1240–1247.
13. H. Hiraguchi. A Novel Simulation Method for Phase Transition of Single Crystal Ni based Superalloys in Elevated Temperature Creep Regions via Discrete Cosine Transform and Maximum Entropy Method. In “Creep in Structures VI”, Holm Altenbach, Konstantin Naumenko eds. *Advanced Structured Materials*, 194 Springer, 2023. p- 151-160.
14. Sunil L. Bangare , Amruta Dubal, Pallavi S. Bangare, Dr. S. T. Patil. Reviewing Otsu’s Method For Image Thresholding. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. Volume 10, Number 9 p. 21777-21783
15. Chethan K S, Sinchana G S, Nataraj K R, Choodarathnakara A L. Analysis of Image Quality using Sobel Filter. Conference: Third International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC). 2019. P. 526-531.
16. Touka Hafsia, Asma Belhaj, Hatem Tlijani, Khaled Nouri, Implementing Canny Edge Detection Algorithm for Different Blurred and Noisy Images. *2022 IEEE 21st international Cnference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, p.342-349
17. Duda, R. O. and P. E. Hart, Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. *Comm. ACM*, Vol.15, pp.11-15
18. Guobo Xie and Wen Lu, Image Edge Detection Based On Opencv. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, Vol. 1, No. 2, 2013. p. 104-106

Надійшла (received) 11.12.2023

Відомості про авторів/ About the Authors

Бреславський Дмитро Васильович (Breslavsky Dmytro) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп’ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: Dmytro.Breslavsky@khp.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3792-5504>

Грошевий Михайло Олександрович (Hroshevyi Mykhailo) – аспірант кафедри комп’ютерного моделювання процесів та систем; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: Mykhailo.Hroshevyi@khp.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3156-4402>

Татарінова Оксана Андріївна (Tatarinova Oksana) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп’ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: Oksana.Tatarinova@khp.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3090-8469>

Сенько Альона Володимирівна (Senko Alyona) – доктор філософії, старший викладач кафедри комп’ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: Alyona.Senko@khp.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9961-7419>