

УДК 621.78:669.15-194

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.240422.57.844

ВПЛИВ ВНУТРІШНІХ ФАКТОРІВ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

ЧМЕЛЬОВА В. С.¹, канд. техн. наук, доц.,ПЕРЧУН Г. І.^{2*}, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Інститут промислових та бізнес-технологій Українського державного університету науки та технологій, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 320-92-67, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

² Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Інститут промислових та бізнес-технологій Українського державного університету науки та технологій, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 698-21-52, e-mail: perchun_galina@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-9013-4659

Анотація. *Мета дослідження* – розроблення методики комплексного впливу внутрішніх чинників отримання необхідних властивостей металевих виробів. Показати на прикладі макроструктури, що не лише кількісний, а й якісний характер впливу зміни досліджуваного внутрішнього фактора може помітно змінюватись залежно від рівня постійних значень інших внутрішніх факторів. *Методика.* Використання методик та впливу різних факторів на комплекс механічних властивостей, необхідних у цих умовах властивостей металевих виробів. Аналітична методика аналізу масиву даних залежності механічних властивостей від внутрішніх факторів за літературними джерелами та даними, отриманими авторами статті. *Результати.* Методика підбору різних внутрішніх факторів для отримання механічних властивостей різноманітних виробів. Показано, що параметри структурного стану пов'язані з типом та характером розподілу атомів речовини одночасно у трьох видах внутрішнього простору об'єкта: геометричному, енергетичному та хімічному (концентраційному). *Наукова новизна.* Інформація про механічні властивості об'єкта, що реалізується як специфічні реакції на зовнішні впливи, а також інформація про можливі перетворення структурного стану об'єкта шляхом фазових та структурних перетворень за специфічного енергоінформаційного впливу. При цьому розроблена методика обов'язково включає врахування рівня складності структурної обробки для одержання заданих механічних властивостей металевих виробів. *Практична значимість.* Використання розробленої методики підвищить експлуатаційну надійність металевих виробів. Показано, що «розмірне» тлумачення макроструктури не відображає одну з головних її властивостей, пов'язаних із походженням (генезою): практичною відсутністю впливу термічної обробки на критичну більшість параметрів макроструктури. Показано, що істотний вплив параметри макроструктури здійснюють на пластичність і опір руйнуванню як в'язкому, так і крихкому. Зі збільшенням індексу забрудненості із характеристики пластичності та опору руйнуванню зменшуються. Інтенсивність падіння цих властивостей за однакових значень із помітно залежить від значень характеристик самих неметалевих включень, перелічених вище. Так, із переходом від включень глобулярної форми до включень нерівноважної форми, зі збільшенням кривизни поверхні розділу «включення – матриця», від пластичних, деформованих включень до крихких, недеформованих негативний вплив цього параметра макроструктури на пластичність та опір руйнуванню посилюється.

Ключові слова: внутрішні фактори; структурний стан; макроструктура; неметалеві включення; навантаження; пластична деформація; опір руйнуванню; механічна анізотропія

INFLUENCE OF INTERNAL FACTORS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF METALS AND ALLOYS

CHMELEVA V.S.¹, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,PERCHUN G.I.^{2*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

¹ Department of Metal Science and Heat Treatment of Metals, Institute of Industrial and Business Technologies Ukrainian State University of Science and Technology, 4, Naharina Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (050) 320-92-67, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

^{2*} Department of Metal Science and Heat Treatment of Metals, Institute of Industrial and Business Technologies Ukrainian State University of Science and Technology, 4, Naharina Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (050) 698-21-52, e-mail: perchun_galina@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-9013-4659

Abstract. Purpose of research. Development of a methods for the internal factors complex influence on obtaining the required properties of metal products. To show, using the example of macrostructure, that not only the quantitative but also the qualitative nature of change impact in the studied internal factor can vary markedly, depending on the constant values level of the other internal factors. **Methodology.** The use of influencing various factors methods on the complex of mechanical properties required in these conditions for metal products. Analytical method of the data array analyses for the dependence of mechanical properties on internal factors according to literature sources and data obtained by the authors of the article. **Results.** Method of various internal factors selecting to obtain the required mechanical properties of various products. It is shown that the parameters of structural state are connected with the type and nature of substance atoms distribution in three types of object internal space simultaneously: geometrical, energetic and chemical (concentration). **Scientific novelty.** Information on the mechanical properties of the object, which is realized as specific reactions to external influences. Information on possible transformations of the object structural state by way of phase and structural transformations under specific energy-information impact. At the same time, the developed method necessarily includes consideration of the structural complexity level in order to obtain the specified mechanical properties of the metal products. **Practical significance.** Using the developed metod to improve the operational reliability of metal products during their operation. It is shown that the “dimensional” interpretation of the macrostructure does not reflect one of its main properties related to the origin (genesis): the practical absence of the heat treatment impact on the critical majority of macrostructure parameters. For practical applications, it is shown that macrostructure parameters have a significant influence on ductility and resistance to both ductile and brittle fracture. As the contamination index I_c increases, the ductility and fracture resistance characteristics decrease. The intensity of the fall in these properties at the same values of I_c is significantly depended on the characteristics values of the most non-metallic inclusions listed above. So, the negative impact of this macrostructure parameter on plasticity and resistance to fracture increases with the transition from globular form inclusions to nonequilibrium form inclusions, with increasing curvature of the surface of the section “inclusions – matrix”, from plastic, deformed inclusions to brittle and undeformed inclusions.

Keywords: *internal factors; structural condition; macrostructure; non-metallic inclusions; loading; plastic deformation; fracture resistance; mechanical anisotropy*

Значення закономірностей впливу внутрішніх факторів на механічні властивості

Значення механічних властивостей металів і сплавів, процеси і явища, які у них відбуваються за силового механічного впливу, істотно залежать від типу і числової величини внутрішніх та зовнішніх чинників.

Під внутрішніми факторами розуміються хімічний склад об'єкта, що навантажується (тип металу, хімічний склад сплаву) і структурний стан об'єкта (фазовий склад і морфологія структури на різних структурних рівнях). Ці фактори зазвичай вважаються регульованими шляхом зміни (вибору) хімічного складу металевго матеріалу та здійснення його термічної або комбінованої структурної обробки.

Зовнішні фактори визначаються умовами експлуатації металовиробів та (або) параметрами технологічного процесу отримання напівфабрикатів або готових металовиробів, машин, конструкцій із заданими розмірами, формою та механічними властивостями.

Ці фактори – температура, швидкість, схема та середовище навантаження, – як правило, нерегульовані, задані.

Завдання спеціалістів у галузі металознавства та термічної обробки металів загалом полягає в тому, щоб на підставі знання основних закономірностей впливу внутрішніх та зовнішніх факторів на механічні властивості забезпечити шляхом регулювання внутрішніх факторів надійну експлуатацію металовиробів за заданих значень зовнішніх факторів та (або) стабільну можливість здійснення даної технології їх одержання.

Сутність внутрішніх чинників, їх класифікація та методика вивчення впливу на механічні властивості

Внутрішні фактори характеризують структурний стан (СС) металевго матеріалу, який формується всередині відповідного об'єкта на різних стадіях (технологічних переробках) його одержання та обробки. Тут слід виділити стадії виплавки та кристалізації, обробки тиском, термічної або комбінованої структурної обробки.

Остання нині далеко не завжди буває лише заключною, але в інтегрованих технологічних процесах отримання металопродукції поєднується з попередніми переробками. У той самий час кожен із названих переробок має характерну функцію і робить свій внесок у формування СС об'єкта і, отже, у формування внутрішніх чинників, які впливають на технологічні та експлуатаційні властивості напівфабрикату чи готового виробу.

Так, стадія виплавки та кристалізації визначає хімічний склад та первинну структуру металевго матеріалу. Обробка тиском, викликаючи зовні формозміни об'єкта, одночасно істотно впливає і на його внутрішню структуру. Термічна або комбінована структурна обробка дає проміжний або кінцевий комплекс параметрів СС, який помітно залежить від вихідного СС, що формується іншими технологічними переділами.

Загалом параметри СС такі: фазовий склад, що визначається хімічним складом об'єкта та фазовими перетвореннями в ньому за різних енергоінформаційних впливів; морфологія структури, яка визначається за заданого хімічного складу відповідними фазовими та структурними перетвореннями; механічний напружений стан, що визначається знову ж таки фазовими та структурними перетвореннями в ході технологічного процесу отримання та обробки металевго об'єкта. Всі перелічені параметри СС загалом пов'язані з типом та характером розподілу атомів речовини одночасно у трьох видах внутрішнього простору об'єкта: геометричному, енергетичному та хімічному (концентраційному). У зазначених просторах можна виділити такі структурні рівні:

1. Макроструктури.
2. Мікроструктури.
3. Тонка (дефектно-кристалічна) структура.
4. Атомно-кристалічна структура.
5. Електронна структура.
6. Ядерна структура.

Наразі між 3- і 4-м структурними рівнями слід, очевидно, розташувати рівень

наноструктури, який становить особливий субрівень тонкої структури. Необхідно враховувати, що власне термічна обробка у твердому агрегатному стані може суттєво впливати на 2–4-й рівні, менш помітно – на 5-й, практично не впливає на 1-й та безумовно не впливає на 6-й рівень.

Для нашого розгляду важливо таке: всі перераховані вище параметри СС, структурні системи та рівні містять інформацію (інформаційний код) двох типів:

А. Інформація про механічні (та інші) властивості об'єкта, що реалізується як специфічні реакції на специфічні зовнішні дії.

Б. Інформація про можливі перетворення СС об'єкта шляхом фазових та структурних перетворень за специфічного енергоінформаційного впливу.

Інформаційний код за п. Б можна розглядати не лише окремо від коду за пунктом А. як генетичну інформацію про технологічні властивості об'єкта, тобто. про можливість та проведення тієї чи іншої структурної (наприклад, термічної) обробки об'єкта.

Якщо властивості об'єкта уявити не як властивості опору зовнішньому (експлуатаційному та технологічному) впливу, а як властивості пристосування до цього впливу, то інформація з п. Б. може забезпечити це пристосування шляхом відповідної зміни СС об'єкта шляхом проходження в ньому фазових та структурних перетворень внаслідок саме даного впливу.

Таким чином, інформація щодо п.п. А і Б у ряді випадків розглядається як суміщена інформація про механічні властивості, причому інформація за п. А. являє собою так звані вихідні дані, початковий комплекс властивостей, з яким металевий матеріал у формі виробу або напівфабрикату входить у процес експлуатації або технологічної обробки, а інформація за п. Б. описує потенційну можливість зміни вихідних властивостей матеріалу в процесі експлуатаційних або технологічних впливів, у тому числі з максимально можливим

приспосовуванням властивостей матеріалу до рівня та характеру таких впливів.

Методика адекватного та коректного дослідження впливу внутрішніх факторів на механічні властивості, крім урахування у необхідній мірі викладеного вище, має відповідати також таким вимогам.

1. Оскільки на механічні властивості об'єкта одночасно впливають усі внутрішні та зовнішні фактори одночасно, то:

1.1. вплив зміни внутрішніх факторів слід проводити за постійних зовнішніх значень, причому найбільш інформативні тут серіальні випробування, коли для кожної серії випробувань значення зовнішніх факторів постійні, але з переходом до нової серії інтервал зміни внутрішніх факторів зберігається, а значення зовнішніх факторів змінюються порівняно з їх значеннями для попередньої серії. Тут особливо важливо, що за таких випробувань може виявлятися як кількісна, так і якісна зміна характеру впливу одного і того ж внутрішнього чинника на механічні властивості;

1.2. враховувати можливість того, що зміна конкретного внутрішнього фактора, вплив якого досліджується, може супроводжуватися помітною зміною іншого (інших) внутрішніх факторів і тому не можна приписати зміни механічних властивостей, що спостерігаються, тільки одному обраному для дослідження внутрішньому фактору;

1.3. з урахуванням комплексного впливу різних внутрішніх факторів на механічні властивості, з одного боку, дуже корисно виявляти парціальний внесок різних внутрішніх факторів у ту чи іншу механічну властивість, а, з іншого боку, – пам'ятати, що не лише кількісний, а й якісний характер впливу зміни досліджуваного внутрішнього фактора може помітно змінюватись залежно від рівня постійних значень інших внутрішніх факторів.

2. Слід оцінювати та враховувати вплив зміни вихідних внутрішніх, особливо структурних, параметрів у процесі механічних випробувань щодо тієї чи іншої механічної характеристики. Чим більше таких змін, тим більше опосередковано дана

характеристика відображує зв'язок із вихідними (до випробування) параметрами структури.

3. Необхідно з'ясувати значення структурної чутливості різних механічних характеристик до різних внутрішніх факторів у різних інтервалах їх зміни з урахуванням знань зовнішніх факторів для зазначених вище інтервалів. На цій підставі виявляються практично значні інтервали суттєвого та слабого впливу різних внутрішніх факторів на ті чи інші механічні властивості.

4. Інтервали зміни значень досліджуваних внутрішніх параметрів визначаються:

4.1. практичними міркуваннями, виходячи з необхідного комплексу механічних властивостей, можливого вибору металів та сплавів та технологій термічної обробки;

4.2. принципово можливими інтервалами зміни різних внутрішніх параметрів на основі металофізики та термодинаміки із встановленням критеріально обумовлених границь (граничних значень) цих інтервалів.

Вплив параметрів макроструктури на механічні властивості

Сутність макроструктури.

Макроструктуру як структурний рівень металевого матеріалу можна загалом характеризувати як рівень так званої первинної структури, що формується технологічними переробками до власне спеціально термічної обробки, що здійснюється.

До таких переробок належать: виплавка, лиття та затвердіння (кристалізація) металів (сплавів) та обробка металів тиском. Така генетична характеристика макроструктури, на нашу думку, більш точна, ніж поширена її характеристика як структурного рівня, що має помітно більші розміри структурних елементів (параметрів) проти інших структурних рівнів. Таке визначення корисне, але не універсальне, оскільки:

1) розміри параметрів макроструктури можна порівняти з параметрами мікро- і навіть тонкої структури;

2) лише «розмірне» тлумачення макроструктури не відображає одну з головних її властивостей, пов'язаних із походженням (генезою): практичною відсутністю впливу термічної обробки на критичну більшість параметрів макроструктури.

Відмічаючи істотні відмінності макроструктури, що формується попередніми до термічної обробки технологічними переробками від структури на інших рівнях, слід, звісно, пам'ятати, що зазначені переробки формують структуру не тільки на рівні макроструктури, а й на інших структурних рівнях. Але характеристики цих інших «рівнів» істотно відмінні від властивостей макроструктури тим, що можуть змінюватися під час наступної термічної обробки.

Основні параметри макроструктури.

1. Несуцільності різного походження та якості – неметалеві включення, тобто об'єми в металевому матеріалі, заповнені неметалевою речовиною: газами з різним ступенем розрядження (так звані негативні включення) та різними твердими неметалічними речовинами (так звані позитивні неметалеві включення).

2. Різні типи макро- та мікроліквації (хімічної та структурної), що формується в процесі кристалізації розплавленого металу (сплаву).

3. Волокниста структура деформованих у переважному напрямі заготовок як перетворена первинна дендритна структура кристалізації з відповідними зонами хімічної ліквації.

Вплив параметрів макроструктури на механічні властивості.

Дотепер найбільшу кількість даних, які дозволяють здійснити їх узагальнення, накопичено за впливом неметалічних включень.

Характеристики останніх:

1). Індекс забрудненості металеві матриці неметалевими включеннями I_z як об'ємна частка цих включень в одиниці об'єму металу. Максимальні значення I_z лежать в інтервалі $10^{-5} \dots 10^{-3}$ см.

2). Розмір включень та його розподіл за розмірами. Спостережуваний діапазон лінійних розмірів по порядку величини: $10^{-5} \dots 10$ см.

3). Форма включень – від близької до сферичної до різних нерівноважних форм.

4). Тип включень: «негативні» та «позитивні».

5). Механічні властивості «позитивних включень», особливо здатність або нездатність до пластичної деформації за навантаження, співвідношення модулів пружності включень та металеві матриці, опір руйнуванню, рівень адгезії включень із металеві матрицею.

6). Кривизна поверхні розділу «включення – металеві матриця», величина якої пов'язана з розміром та формою включень.

7). Характер розподілу неметалевих включень у неметалеві матриці – від хаотичного, статистично рівномірного до впорядкованого, орієнтованого.

Вплив індексу забрудненості та форми включень на пластичність, опір руйнуванню та температуру холодноламкості показано на рисунку 1.

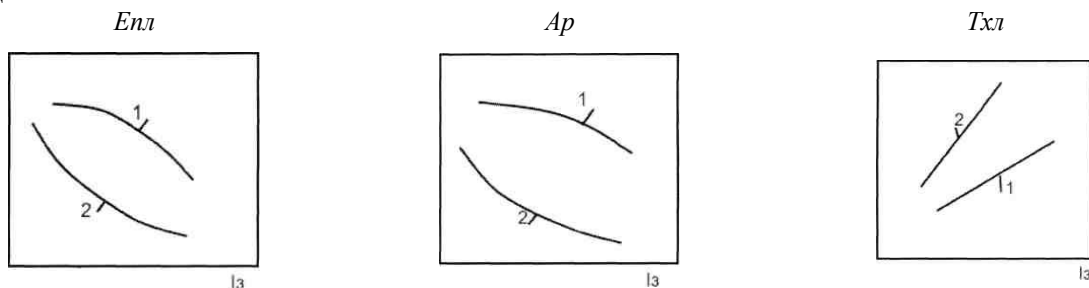


Рис. 1. Вплив індексу забрудненості (I_z) та форми включень (1 – глобулярна форма; 2 – нерівноважна, гострокутна форма) на пластичність ($E_{пл}$), опір руйнуванню (A_r) та температуру холодноламкості ($T_{хл}$)

Оскільки вплив типу об'ємного розподілу елементів макроструктури, особливо нерівноважної форми з великим співвідношенням максимального лінійного розміру до мінімального, на механічні властивості суттєвий, слід розглядати вплив інших характеристик параметрів макроструктури з урахуванням цього розподілу.

Через зазначену вищу малу об'ємну частку неметалевих включень їх вплив на опір деформації незначний, якщо метал (сплав) перебуває під час навантаження у в'язко-пластичному стані.

Істотно впливають неметалеві включення на пластичність і опір руйнуванню, як в'язкому, так і крихкому. Зі збільшенням індексу забрудненості I_z , як показують схеми на рисунку 1, характеристики пластичності та опору руйнуванню зменшуються.

Інтенсивність зниження цих властивостей за однакових значень I_z помітно залежить від значень характеристик самих неметалевих включень, перелічених вище. Так, із переходом від включень глобулярної форми до включень нерівноважної форми, зі збільшенням кривизни поверхні розділу «включення – матриця», від пластичних, деформованих включень до крихких, недеформованих негативний вплив цього параметра макроструктури на пластичність та опір руйнуванню посилюється.

Вплив розміру включень за постійного значення I_z залежить від форми включень і в'язкого або крихкого стану металеві матриці. Якщо включення мають глобулярну (близьку до сферичної) форму, то збільшення їх розмірів зменшує поверхні розділу і число включень, що зумовлює підвищення пластичності і опору в'язкому руйнуванню. Збільшення ж розмірів нерівноважних включень в основному за рахунок збільшення максимального лінійного розміру і без зменшення кривизни поверхні розділу неоднозначно впливає на пластичність і опір в'язкому руйнуванню і однозначно знижує опір крихкому руйнуванню. В останньому випадку

неметалеве включення сприймається як крихка тріщина критичного розміру, що спричинює відповідне навантаження до нестабільного етапу крихкого руйнування.

Критичний лінійний розмір включення $L_{кр}^{вкл}$ описується:

$$L_{кр}^{вкл} = \frac{K_{1C}^2}{Y^2 n^2 \sigma_m^2}, \quad (1)$$

де K_{1C} – параметр в'язкості руйнування; Y – безрозмірний коефіцієнт, що залежить від геометрії тріщини та її розташування в об'єкті щодо вектора максимальної розтягувальної напруги; $n\sigma_m$ – значення експлуатаційної розтягувальної напруги, причому n – коефіцієнт запасу міцності ($n < 1$); σ_m – фактична границя плинності даного металу (сплаву) під час випробувань на розтяг.

З рівняння (1) виходить, що за постійних значень K_{1C} і n (постійність останнього необхідна, щоб реалізувати на практиці підвищену границю плинності); зі зростанням величини σ_m (зі зміцненням металевого матеріалу) розмір критично небезпечного включення ($L_{кр}^{вкл}$) швидко зменшується. Наприклад, збільшення значення σ_m з 250 до 1 000 МПа зменшує величину $L_{кр}^{вкл}$ більш ніж на порядок – у 16 разів (!).

Насправді це зменшення, тобто збільшення небезпечного крихкого руйнування через присутність у металі включень навіть невеликих розмірів, ще значніше, оскільки зі зростанням σ_m значення K_{1C} зазвичай зменшується. Таким чином, зі збільшенням рівня міцності металу (сплаву) – як збільшення характеристик опору деформації – зростає несприятливий вплив як індексу забруднення неметалевими включеннями, так і збільшення лінійних розмірів цих включень за великого ступеня кривизни поверхні розділу «включення – матриця» у певних областях цієї поверхні для нерівноважних включень.

Тому для надійної реалізації результатів зміцнювальних обробок необхідно приділяти особливу увагу зниженню індексу забрудненості, переведенню включень у форму з малою кривизною поверхні,

обграничченню максимальних розмірів включень, якщо останні можуть провокувати під час навантаження крихке руйнування.

Оскільки все зазначене можна забезпечити лише на попередніх перед термічною обробкою переробках, необхідний рівень відповідних параметрів макроструктури металу (сплаву), що надходить на термообробку, повинен регламентуватися відповідними фахівцями та забезпечуватися технологією попередніх переділів.

Значення параметрів макроструктури для особливо відповідальних високоміцних виробів настільки велике, що для них в як здавальні випробування використовується не тільки необхідний комплекс механічних властивостей, а й максимальний розмір внутрішніх несучільностей, що реєструється методами дефектоскопії всього об'єму виробу, який повинен бути менше значення $L_{кр}^{вкл}$, що визначається за рівнянням (1). При цьому тут ідеться не лише про параметри неметалевих включень. Не менше значення має і структурна ліквіація, що визначається виділенням певних фаз із розплаву під час кристалізації. Це, наприклад, різні види карбідної неоднорідності в середньо- та високолегованих інструментальних сталях, які практично не піддаються «виправленню» термічною обробкою, але істотно можуть

бути усунені раціональними режимами гарячого кування.

Вплив макроструктури за спрямованого розподілу її елементів

Спрямований розподіл елементів макроструктури, тобто переважна орієнтація несучільностей і волокон, характерна для металів і сплавів, що деформуються у переважному напрямку, а також, певною мірою, це властиво для литих металів, що кристалізуються в умовах різко вираженого спрямованого тепловідведення.

За вказаного типу розподілу елементів макроструктури виникає явище механічної анізотропії. Це означає, що вплив макроструктури на механічні властивості у різних напрямках неоднаковий.

Явище механічної анізотропії виявляється у відмінності в механічних властивостях об'єкта, коли вектор силового впливу по-різному орієнтований щодо напрямку переважної орієнтації елементів макроструктури. Під вектором силового впливу розуміється, головним чином, вектор максимальної напруги розтягування.

На рисунку 2 наведено поперечні (ПП) та поздовжні (ПР) зразки та кількісна оцінка анізотропії. Кількісною оцінкою анізотропії є коефіцієнт анізотропії – K_A . Під час деформації включення спрямовані у напрямі вектора головної деформації.

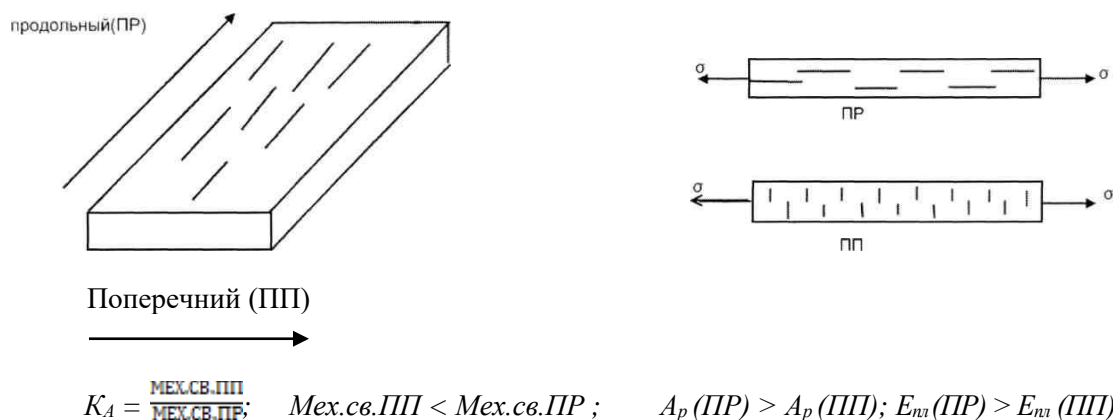


Рис. 2. Визначення коефіцієнта анізотропії (K_A)

Для поздовжніх зразків вектор розтягувальних напруг паралельний напрямку прокатки. Для поперечних зразків

вектор розтягувальних напруг нормальний напрямку прокатки. Чим більше відхилення

K_A від одиниці, тим більше виражена анізотропія.

Макроструктура, як і раніше, чинить основний вплив на характеристики опору руйнуванню та пластичності.

Оскільки основна частина металопродукції отримана обробкою металів тиском, явище механічної анізотропії має велике практичне значення. Явище анізотропії на практиці враховують за трьома основними напрямками:

1. Під час здавальних випробувань металопродукції:

– якщо напрямок розтягувальних напруг експлуатації невідомий, випробуванню піддають поперечні зразки – найбільш жорсткі умови.

2. У використанні природної механічної анізотропії на практиці:

– якщо відомі умови експлуатації металопродукції, вектори напрямів, що

розтягують, враховують під час вирізання виробу з прокату в певному напрямку. Наприклад, вирізання ресор із листа в поздовжньому напрямку.

Щоб оптимально використовувати матеріал, потрібно використовувати більш ізотропні матеріали.

Шляхи усунення анізотропії:

1) зробити метал чистішим;

2) перевести включення у рівноважну (глобулярну форму) – модифікувати шляхом додавання легувальних елементів. Модифікаторами є рідкісноземельні метали, наприклад, церій.

Причини впливу макроструктури на механічні властивості

Усі види елементів макроструктури – це своєрідні внутрішні концентратори напруги (рис. 3).

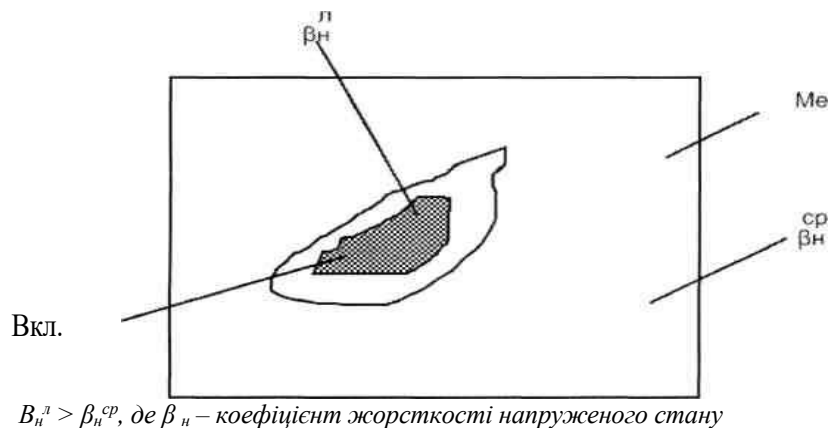


Рис. 3. Схема підвищення локальної напруги навколо неметалевого включення

Причини впливу:

1. неметалеві включення являють собою внутрішні концентратори напруг;

2. збільшується ступінь жорсткості напруженого стану β_n ;

3. властивості самого включення. Якщо крихке включення пов'язане з матрицею, тріщини із включень поширюються на матрицю, викликаючи обграницення пластичності та руйнування.

У разі спрямованого розподілу елементів макроструктури слід враховувати додаткові умови:

а) у поздовжніх зразках траєкторія поширення тріщин складна, макроструктура надає екранувальний вплив на поширення тріщин;

б) у поперечних зразках зародження та розповсюдження тріщин різко полегшується;

в) зміна так званого ефективного розміру включення в поздовжньому та поперечному напрямках (рис. 4).

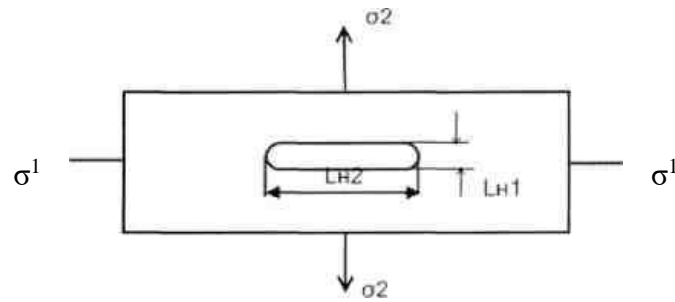


Рис. 4. Ефективний розмір включення (L_n) у поздовжньому та поперечному напрямках

$$Kt = 1 + a \sqrt{\frac{L_{H1}}{R_n}}$$

$$Kt = 1 + a \sqrt{\frac{L_{H2}}{R_n}}$$

де R_n – радіус закруглення; a – коефіцієнт; Kt – коефіцієнт концентрації напруг.

У поздовжньому напрямку включення є слабким концентратором напруг.

Висновки

Розроблено нову методику вибору внутрішніх факторів для забезпечення необхідної експлуатаційної надійності виробів, яка враховує можливі інтервали зміни різних внутрішніх параметрів на основі металофізики та термодинаміки із встановленням критеріально зумовлених границь (граничних значень) цих інтервалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Золотаревский В. С. Механические свойства металлов : учеб. для вузов, 3-е изд., перераб. и доп. Москва : МИСИС, 1998. 400 с.
2. Бернштейн М. Л., Займовский В. А. Механические свойства металлов : учеб., 2-е изд. перераб. и доп. Москва : Металлургия, 1979. 496 с.
3. Лившиц Б. Г. и др. Физические свойства металлов и сплавов. Москва : Металлургия, 1980. 320 с.
4. Гуль Ю. П., Чмелева В. С. Структура и механические свойства металлов и сплавов : учеб. пособ. Днепропетровск : НМетАУ, 2005. 40 с.
5. Беда Н. И. и др. Неразрушающий контроль металлов и изделий : справочник. Москва : Машиностроение, 1976. 456 с.
6. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. В 2 частях. Части 1–2. Москва : Машиностроение, 1974.
7. Полухин П. И. и др. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник. Москва : Металлургия, 1976. 488 с.
8. Херцберг Р. В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов : справочник. Под ред. Блюменаура. Москва : Металлургия, 1989. 575 с.
9. Чмельова В. С., Перчун Г. І. Підвищення конструкційної міцності труб нафтового сортаменту, що працюють у агресивному середовищі. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2021. № 2 (93). С. 70–76.
10. Гуль Ю. П., Чмельова В. С. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів : навч. посіб. Дніпро : НМетАУ, 2017. 34 с.
11. Лебедев А. А., Ковальчук Б. И., Гигиняк Ф. Ф., Ламашевский В. П. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии : справочник. Институт пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. Київ : Издательский дом «Ин Юре», 2003. 539 с.

REFERENCES

1. Zolotarevskiy V.S. *Mekhanicheskie svoystva metallov : uchebnik dlya vuzov* [Mechanical properties of metals : textbook for universities]. 3rd edition, revised and additional. Moscow : MISIS, 1998, 400 p. (in Russian).
2. Bernshteyn M.L. and Zaymovskiy V.A. *Mekhanicheskie svoystva metallov : uchebnik* [Mechanical properties of metals : textbook]. 2nd edition, revised and additional. Moscow : Metallurgiya Publ., 1979, 496 p. (in Russian).
3. Livshits B.G. and oth. *Fizicheskie svoystva metallov i splavov* [Physical properties of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1980, 320 p. (in Russian).
4. Gul Yu.P. and Chmeleva V.S. *Struktura i mekhanicheskie svoystv metallov i splavov : uchebnoe posobie* [Structure and Mechanical Properties of Metals and Alloys : textbook]. Dnepropetrovsk : NMetAU, 2005, 40 p. (in Russian).

5. Beda N.I. and oth. *Nerazrushayuschiy kontrol metallov i izdeliy : spravochnik* [Non-destructive testing of metals and products : directory]. Moscow : Mashinostroenie Publ., 1976, 456 p. (in Russian).
6. Fridman Ya.B. *Mehanicheskie svoystva metallov* [Mechanical properties of metals]. In 2 parts, parts 1–2. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1974. (in Russian).
7. Poluhin P.I. and oth. *Soprotivlenie plasticheskoy deformatsii metallov isplavov : spravochnik* [Resistance to Plastic Deformation of Metals and Alloys : directory]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1976, 488 p. (in Russian).
8. Hertsberg R.V. *Deformatsiya i mehanika razrusheniya konstruktsionnykh materialov : spravochnik* [Deformation and Fracture Mechanics of Structural Materials : handbook]. Edited by Blumenauer. Moscow : Metallurgiya Publ., 1989, 575 p. (in Russian).
9. Chmeleva V.S. and Perchun G.I. *Pidvischennya konstruktsiynoyi mitsnosti trub naftovogo sortamentu, scho pratsyuyut u agresivnomu seredovischi* [Advancement of the structural strength of naphtha grade pipes, which can be applied to an aggressive medium]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2021, no. 2 (93), pp. 70–76. (in Ukrainian).
10. Gul Yu.P. and Chmeleva V.S. *Mehanichni vlastivosti ta konstruktsiyna mitsnist materialiv : navchalniy posibnyk* [Mechanical properties and structural strength of materials : textbook]. Dnipro : NMetAU Publ., 2017, 34 p. (in Ukrainian).
11. Lebedev A.A., Kovalchuk B.I., Giginyak F.F. and Lamashevskiy V.P. *Mehanicheskie svoystva konstruktsionnykh materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii : spravochnik* [Mechanical Properties of Structural Materials under Complex Stress State : handbook]. NAS of Ukraine, Institute of Problem Strength named G.S. Pisarenko. 3rd edition, revised and additional. Kyiv : «In Yure» Publishing House, 2003, 539 p. (in Russian).

Надійшла до редакції 15.03.2022.