

Гуль Ю.П., Івченко О.В., Перчун Г.І., Чмельова В.С.

Теоретичне і технологічне обґрунтування нових технологічних схем отримання сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією

Gul Yu.P., Ivchenko O., Perchun G., Chmeleva V.

Theoretical and technological substantiation of new technological schemes for producing steel products hardened by the cold deformation

Мета. На основі аналітичних і експериментальних досліджень обґрунтувати можливість використання нових принципів взаємодії дефектів кристалічної будови в процесі холодної пластичної деформації для формування нового структурного стану сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією. Визначити зміст і послідовність нових технологічних операцій і типу відповідного технологічного устаткування для їх виконання та розробити варіанти технологічних схем отримання сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією.

Методика. Зіставлення способів термічного, деформаційно-термічного зміцнення зі способом деформаційного зміцнення і заснований на ньому новій технології зміцнення сталевих виробів з існуючими технологіями. Розроблена та використана методика експериментального дослідження синергетики активної, циклічної деформації та низькотемпературних додаткових впливів та їх параметрів на структурний стан та властивості холоднодеформованих виробів.

Результати. Розроблені нові технологічні схеми отримання холоднодеформованих виробів з низьковуглецевих нелегованих сталей з використанням різноманітних комбінацій активної і циклічної деформації та температурних впливів, які дозволяють одночасно підвищити рівень міцності заготовки та її пластичність. Отриманий комплекс властивостей таких виробів характеризується поєднанням заданого рівня зміцнення з необхідними рівнями опору крихкому, в'язкому і втомному руйнуванню, а деформаційне старіння таких холоднодеформованих виробів не призводить до неприпустимого погіршення їх властивостей.

Наукова новизна. Запропоновано спосіб легування об'єкту нерівноважною концентрацією вакансій за рахунок здійснення циклічної деформації, який ґрунтується на збільшенні значень нерівноважної концентрації вакансій внаслідок особливостей дислокаційного механізму циклічної деформації. Запропоновано новий варіант вакансійного загартування, коли використовується ефект збагачення металу вакансіями в процесі рекристалізації сильно холоднодеформованого металу і дозволяє отримати дуже дрібне зерно, що сприятливо для механічних та експлуатаційних властивостей холоднодеформованих сталевих виробів. Таким чином, вперше розроблений спосіб зміцнення сталі при холодній деформації за рахунок диспергування структури на двох розмірних рівнях, а саме, на рівні мікроструктури (феритного зерна) і дислокаційної структури усередині цих зерен.

Практична значущість. Розроблена технологія дає кращу логістику і екологічність виробництва за рахунок виключення технологічних операцій високотемпературного нагріву і швидкого охолодження; зменшує витрати енергії, так і за властивостями виробу дає поєднання технологічної деформації формозміни з додатковим зміцненням виробу і можливістю надання виробу форми, при якій реалізуються принципи геометрично-структурного зміцнення. Отримання виробу точних розмірів з малою шорсткістю поверхні додатково підвищує його експлуатаційну надійність, а отримуваний структурний стан - підвищення опору циклічному навантаженню

Ключові слова: холодна пластична деформація, циклічна деформація, деформаційне зміцнення, деформаційне старіння, вакансійний гарт, швидкісна рекристалізація, дефекти кристалічної будови, структурний стан, технологічні операції, технологічні схеми виробництва холоднодеформованих виробів.

Purpose. Comparison of methods of thermal, deformation-thermal hardening with the method of deformation hardening and the new technology of hardening of steel products based on it with existing technologies. The method of experimental research of synergetics of active, cyclic deformations and low-temperature additional influences and their parameters on a structural condition and properties of cold-deformed products is developed and used.

Methodology. Comparison of methods of thermal, deformation-thermal hardening with the method of deformation hardening and the new technology of hardening of steel products based on it with existing technologies. The method of experimental research of synergetics of active, cyclic deformations and low-temperature additional influences and their parameters on a structural condition and properties of cold-deformed products is developed and used.

Findings. New technological schemes for obtaining cold-formed products from low-carbon non-alloy steels using various combinations of active and cyclic deformation and temperature effects, which simultaneously increase the strength of the workpiece and its ductility. The resulting set of properties of such products is characterized by a combination of a given level of hardening with the required levels of resistance to brittle, viscous and fatigue failure, and deformation aging of such cold-formed products does not lead to unacceptable deterioration of their properties. *Originality.* A method of doping an object with a nonequilibrium concentration of vacancies due to cyclic de-

Гуль Юрій Етрович – к.т.н., доц. НМетАУ
Івченко Олександр Васильович – к.т.н., ст.наук.с. НМетАУ
Перчун Галина Іванівна – к.т.н., доц. НМетАУ
Чмельова Валентина Іванівна – к.т.н., доц. НМетАУ

Gul Yu. - Ph.D., Assoc. Prof. NMetAU
Ivchenko O. - Ph. D., Senior Sc.
Perchun G. - Ph.D., Assoc. Prof. NMetAU
Chmeleva V. - Ph.D., Assoc. Prof. NMetAU

mation is proposed, which is based on increasing the values of nonequilibrium concentration of vacancies due to the peculiarities of the dislocation mechanism of cyclic deformation. A new variant of vacant hardening is also proposed, when the effect of metal enrichment with vacancies in the process of recrystallization of strongly cold-deformed metal is used and allows to obtain very fine grain, which is favorable for mechanical and operational properties of cold-deformed steel products. Thus, for the first time a method of hardening of steel at cold deformation due to dispersion of structure at two dimensional levels, namely, at the level of microstructure (ferrite grain) and dislocation structure inside these grains is developed.

Practical significance. The developed technology gives the best logistics and sustainability of the production due to the exclusion of technological operations high-temperature heating and rapid cooling; reduces the cost of the billet, since the cold deformation does not require alloying; allows you to billet universal for many types of products produced by cold deformation. Significant benefits, both in energy consumption and the properties of the product allows the combination of technological deformation of the deformation with the additional strengthening of the product and give the product form, in which implemented the principles of geometric and structural strengthening. The receipt of the product, exact dimensions and low surface roughness further enhances its operational reliability, and the resulting structural condition of increased resistance to cyclic loading.

Key words: cold plastic deformation, cyclic deformation, deformation hardening, deformation aging, vacancy hardening, speed recrystallization, defects of crystal structure, structural state, technological operations, technological schemes of production of cold - deformed products.

Вступ. Технології отримання зміцнених сталевих виробів з використанням різних способів зміцнення мають велику літературу. У той же час технологіям отримання сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією, приділяється значно менша увага. Зазвичай, прийнято розглядати зміцнені холоднодеформовані вироби як ненадійні. Тут дуже показова «свіжа» 2018 року видання монографія [1]. З майже 1000 сторінок монографії способам зміцнення сталі холодною деформацією відведено 1,5 сторінки та до 10-15 сторінок монографії приділено перерахуванню недоліків цього способу зміцнення і ненадійності одержаних таким чином виробів, як неприпустимо крихких і схильних до «деградації» структурного стану внаслідок деформаційного старіння.

Метою даної роботи є:

1) На основі аналітичних і експериментальних досліджень обґрунтувати можливість використання нових принципів взаємодії дефектів кристалічної будови в процесі холодної пластичної деформації для формування нового структурного стану сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією. При цьому комплекс властивостей таких виробів характеризується поєднанням заданого рівня зміцнення з необхідними рівнями опору крихкому, в'язкому і втомному руйнуванню, а деформаційне старіння таких холоднодеформованих виробів не призводить до неприпустимого погіршення їх властивостей, зазначених вище;

2) Визначити зміст і послідовність нових технологічних операцій і типу відповідного технологічного обладнання для виконання цих технологічних операцій;

3) Визначити переваги нової технології, в порівнянні з відомими, що використовують способи термічного зміцнення, способи деформаційного (в тому числі холодною деформацією) і деформаційно-термічного зміцнення по ряду основних технологічних показників і якості одержаних сталевих виробів.

Виходячи з постановки задачі даної роботи, доцільно спочатку коротко розглянути технології отримання зміцнених сталевих виробів з викори-

станням найбільш відомих способів зміцнення з виділенням: механізму зміцнення; основних технологічних операцій; основних параметрів, що забезпечують можливість даного виду зміцнення; якості одержаних зміцнених виробів по точності їх геометрії і стану поверхні; можливості суміщення операції зміцнення з отриманням виробів заданої геометрії і шорсткості поверхні.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Всі відомі способи зміцнення сталі засновані на одному принципі: збільшенні концентрації дефектів кристалічної будови, але різним способом, різних типів дефектів кристалічної будови і різних умов у можливості збільшення концентрації дефектів кристалічної будови.

Термічне зміцнення засноване на забезпеченні в сталі фазових перетворень відповідного типу при даному хімічному складі, який є одним з головних регулюючих параметрів; на основних технологічних операціях: нагріванні, охолодженні, ізотермічних витримках (температура, час) [1]; на основних типах фазових перетворень, що відбуваються: мартенситних, бейнітних, розпаді пересичених твердих розчинів; на основних типах дефектів кристалічної будови, збільшення концентрації яких дає зміцнення: поверхневих (двоірних) і лінійних (дислокацій при мартенситних і бейнітних перетвореннях) [1]. Сполучення в часі технологічних операцій зміцнення і отримання сталевих виробів заданої геометрії неможливо тому, що якість поверхні зміцненого сталевих виробу вимагає спеціальної механічної обробки, так само як і доведення геометричної форми.

Деформаційне зміцнення найбільш ефективно при холодній деформації і не вимагає спеціального легування (звичайна сталь з вмістом вуглецю до 0,3% по масі) і, в принципі, може бути ефективним взагалі для технічного заліза та інших металів без будь-якого легування. Деформаційне зміцнення пов'язано зі збільшенням концентрації дислокацій і дисклінацій. Технологічні операції пов'язані із забезпеченням холодної пластичної деформації, причому, цілком можливо суміщення технологічної операції зміцнення з технологічною операцією отримання

мання виробу заданої геометрії з малою шорсткістю поверхні. Разом з тим, деформаційне зміцнення звичайної сталі пов'язане з небезпекою руйнування або заготовки, що деформується, або при експлуатації холоднодеформованого виробу [2]. Тому в технологічний процес зміцнення сталевих виробів слід вводити нові додаткові технологічні операції, які забезпечують усунення небезпеки руйнування за рахунок зміни механізму руху дислокацій і отримання нових типів дислокаційних структур зі зниженим значенням запасової пружної енергії і іншими особливостями. Ці нові технологічні операції засновані на легуванні сталі певною нерівноважною концентрацією вакансій [3, 4]. Технологічні параметри, що забезпечують формування такого структурного стану: ступінь холодної деформації (схема холодної деформації), легування сталі на певних етапах технологічного процесу нерівноважною концентрацією вакансій.

Деформаційно-термічне (термомеханічне) зміцнення [1, 5].

При всіх видах деформаційно-термічного зміцнення відповідний ефект досягається збільшенням концентрації дислокацій і поверхневих дефектів в різних співвідношеннях залежно від варіанту цього зміцнення. Комбінації способів термічного і деформаційного зміцнення передбачають гарячу, теплу і холодну деформацію. При цьому деформації піддаються стабільні або метастабільні фази, що одержані нагріванням або гартівним охолодженням. Отримана дислокаційна структура успадковується сталлю в процесі мартенситних, бейнітних, а також фазових перетворень розпаду твердих розчинів. Це дозволяє, певною мірою, використовувати переваги деформаційного зміцнення і істотно розширити спектр одержаних структурних станів. Однак, зазначені вище недоліки термічного зміцнення, пов'язані з необхідністю нагрівів і швидкісних охолоджень, а також ізотермічних витримок і необхідністю дотримання певного хімічного складу сталей притаманні і способам поєднання термічного і деформаційного зміцнення. Мабуть, тільки запропонований ще в 80-х роках минулого століття спосіб термо-механіко-термічної обробки (ТМТО) [6] дозволяє в максимальному ступені використовувати переваги деформаційного зміцнення холодною деформацією при формуючій технологічній деформації з мінімальним негативним технологічним впливом недоліків способів термічного зміцнення.

Зіставлення способів термічного зміцнення, деформаційно-термічного зміцнення і заснованих на них технологій зі способом деформаційного зміцнення і заснованих на ньому новій технології зміцнення сталевих виробів говорить про переваги останньої. Але для обґрунтування можливості практичної реалізації заявлених переваг необхідний більш детальний розгляд теоретичних принципів нового технологічного процесу.

Як вже зазначалося вище, в новій технології отримання сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією, мають місце кілька основних технологічних операцій з відповідними параметрами.

Перш за все, це активна холодна деформація (деформація, при якій вектори деформаційних навантажень не змінюють свого напрямку щодо деформованого об'єкта, а деформуюча напруга практично постійно зростає). Параметрами активної деформації є: ступінь деформації, схема деформації, використання різних схем навантаження в певній послідовності, ступінь деформації, при якій подальше легування вакансіями дає максимальний ефект. Із зазначеного вище випливає наявність значної кількості параметрів активної холодної деформації, що вимагає їх оптимізації для даного об'єкта при його деформації і отриманні властивостей. Можливе використання наступних апробованих схем активної холодної деформації: одноісне розтягнення, волочіння, плющення, всебічне нерівномірне стиснення. З точки зору нової концепції, введення в об'єкт нерівноважною концентрації вакансій істотно змінює механізм пластичної деформації і одержаний комплекс властивостей холоднодеформованого металу. Особливо приваблива схема всебічного нерівномірного стиснення, так як вона не вимагає окремих технологічних операцій для легування об'єкта нерівноважною концентрацією вакансій. Таке легування здійснюється при самій деформації об'єкта. Рівноважна концентрація вакансій при температурі холодної деформації стає нерівноважною з підвищенням всебічного тиску [4].

Однак, ця перевага схеми всебічного нерівномірного стиснення багато в чому нівелюється необхідністю високих енерговитрат і низькою продуктивністю процесу в порівнянні зі схемами деформації, зазначеними вище [7]. Тому для технології отримання зміцнених холодною деформацією сталевих виробів масового призначення слід вибирати простіші схеми холодної деформації і інші способи легування нерівноважною концентрацією вакансій сталевих об'єктів. При цьому потрібно максимально використовувати вплив схеми деформації при однаковому геометричному ступеню деформації на опір крихкому руйнуванню, встановленому експериментально [8, 9]. Визначити ефекти впливу нерівноважною концентрації вакансій на сформовану дислокаційну структуру об'єкта іншими і більш продуктивними способами, ніж всебічне нерівномірне стиснення. Якщо врахувати, що отримані об'єкти можуть наражатися на небезпеку не тільки крихкого руйнування, але і в'язкого руйнування по крихкому типу [10], то важливо використовувати вплив схеми деформації і геометрії навантаженого об'єкта на схильність до локалізації пластичної деформації [11].

Загалом, критеріями оптимізації параметрів активної деформації можуть бути: мінімізація

енерговитрат, пружної енергії, що запасається в об'єкті, небезпека утворення тріщин, в'язкого руйнування по крихкому типу, схильність до деформаційного старіння. Теоретичною основою досягнення зазначеної мінімізації шляхом оптимізації технологічних параметрів активної холодної деформації, а також операцій легування нерівноважної концентрацією вакансій ϵ : отримання дислокаційної субструктури з мінімумом мікроб'ємів скупчень дислокацій одного знака і з максимумом мікроб'ємів «геометричної» взаємодії дислокацій, що призводить до взаємogasіння полів напружень у дислокацій, дислокаційна субструктура, що описується як регулярна субструктура дислокаційних фрагментів з квазірівноважними дислокаційними межами.

Принципи нової технології передбачають отримання необхідного рівня зміцнення за двома варіантами: а) шляхом технологічної деформації незміцненої заготовки при отриманні виробу заданої геометрії; б) якщо при цьому не досягається заданий рівень зміцнення і комплекс властивостей, то передбачено зміцнення заготовки.

Умови оптимізації технологічних параметрів ускладнюються, бо деформація заготовки повинна не тільки зміцнювати її, а й надати їй необхідну технологічну пластичність. Взагалі сама задача отримання зміцненого виробу за схемою: зміцнення заготовки - отримання з неї виробу холодною деформацією - вимагає окремого рішення проблеми: в якій мірі структурний стан заготовки «спотворюється» при холодній деформації отримання виробу і як вирішити задачу оптимізації деформації заготовки з урахуванням подальшої деформації. Проте, можливо використовувати загальні теоретичні основи такої побудови технологічного процесу, який повинен вирішити головне питання - отримання готового холоднодеформованого виробу з заданим структурним станом і комплексом властивостей.

Нами отримані експериментальні дані, що можливо отримати такий тип дислокаційної структури (іноді в поєднанні з мікроструктурою), при якому подальша холодна деформація і старіння після неї, хоча і викликає додаткове зміцнення, але істотно не знижує опір крихкому руйнуванню [12, 13].

З огляду на всю важливість оптимізації технологічних параметрів активної холодної деформації і легування нерівноважною концентрацією вакансій, слід підкреслити перспективи оптимізації не тільки технологічних параметрів процесу, а й оптимізації геометрії самих виробів. Тут можуть бути використані принципи геометричного структурного зміцнення [14]. Якщо для виробу найбільш небезпечно крихке руйнування, то слід зменшити його масивність і відстань між вільними його поверхнями. Якщо ж виникає небезпека в'язкого руйнування по крихкому типу, то слід обмежити ступінь зменшення діаметрів, товщини і т.п. виробів з урахуванням схем експлуатаційних навантажень і геометрії виробу.

Активна холодна деформація вирішує завдання структурного легування об'єкта лінійними дефектами (дислокаціями), тобто, образно кажучи, забезпечує поставку «будівельного матеріалу» для побудови дислокаційних конфігурацій. Завданням вакансій необхідної нерівноважної концентрації, що вводяться в об'єкт, є забезпечення специфічної взаємодії вакансій з дислокаціями (перш за все, рухомими). Це стимулює неконсервативне ковзання дислокацій і певні зміни їх геометрії. В кінцевому рахунку забезпечується отримання квазірівноважних дислокаційних конфігурацій з максимально можливим ефектом «взаємogasіння» полів напружень у дислокацій.

Другим основним типом технологічних операцій в новій технології є технологічні операції вакансійного легування об'єкта, які розрізняються: по використаному типу (механізми) цього легування; за місцем у технологічному процесі щодо технологічної операції – активна холодна деформація, а також за механізмом отримання нерівноважної концентрації вакансій.

Слід більш докладно розглянути технологічні операції, пов'язані з легуванням об'єкта нерівноважною концентрацією вакансій, оскільки вони в максимальному ступені характеризуються науковою новизною і забезпечують ряд незвичайних ефектів в технологічному ланцюжку виробництва.

В даному проекті пропонується кілька способів отримання і легування об'єкту нерівноважною концентрацією вакансій. Умовно їх можна розділити на 2 типи:

1. Термічний вплив - вакансійний гарт, заснований на температурній залежності рівноважної концентрації та можливості фіксувати підвищену концентрацію вакансій при температурах активної холодної деформації шляхом досить швидкого охолодження. Необхідність високотемпературних нагрівів і швидких охолоджень є технологічним недоліком способу вакансійного гарту. Шляхом розрахунків і експериментів виявляються необхідні температури нагріву і швидкості охолодження, а також максимально можливий часовий інтервал між закінченням гарту і початком активної холодної деформації [5, 14]: температура нагріву, швидкість охолодження, вказаний часовий інтервал - такі технологічні параметри технологічної операції - вакансійний гарт, при цьому витримка при температурі нагріву не обов'язкова.

Так як при індукційному нагріванні і вельми швидкому подальшому охолодженні тривалість операції становить кілька десятків секунд, то розглянута технологічна операція не лімітує загальну тривалість технологічного процесу. У той же час високі температури нагріву (за нашими даними 950°C для технічного заліза і $\sim 1200^{\circ}\text{C}$ для аустенітної сталі [5, 15]) збільшують високотемпературний інтервал охолодження і тим самим процес «відпалу вакансій». Це підвищує

вимоги до інтенсивності охолодження. Однак, температуру нагрівання можна істотно знизити, спираючись на дані роботи [16].

Тому в проекті запропоновано новий варіант вакансійного гарту, в якому використовується ефект збагачення металу вакансіями в процесі рекристалізації сильно холоднодеформованого металу. Для цього використовується холоднодеформований об'єкт, що піддається швидкісному нагріву і, відповідно, швидкій рекристалізації. Крім потрібних нижчих температур нагрівання і швидкостей охолодження, новий варіант вакансійного гарту дозволяє отримати досить дрібне зерно. Останній факт дуже сприятливий для властивостей сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією.

Отже, технологічна операція легування об'єкта нерівноважною концентрацією вакансій способом вакансійного гарту може виконуватися в 2-х варіантах, що відрізняються між собою як вихідним структурним станом об'єкта, так і підоперацією у зазначеній вище технологічній операції. Крім того відрізняються і такі технологічні параметри, як температура нагріву, швидкість охолодження.

У першому варіанті обробляемий об'єкт має структурний стан, характерний для гарячодформованої низьковуглецевої сталі, температури нагріву від $900-950^{\circ}\text{C}$ і вище; швидкості охолодження від 10^2 град/с і вище. Структурний стан сталі змінюється за рахунок підвищення нерівноважної концентрації вакансій, впливає на механізм подальшої активної холодної деформації і дислокаційну субструктуру, що формується.

У другому варіанті обробляемий об'єкт перед нагріванням піддається інтенсивній активній холодної деформації і його структурний стан характеризується підвищеною щільністю дислокацій, температури нагріву істотно нижче, ніж в першому варіанті: наприклад, для сталі - $600 - 650^{\circ}\text{C}$ і нижче, швидкості охолодження до 10^2 град/с. Стан змінюється як на рівні мікроструктури (подрібнення зерна), так і на рівні дефектів кристалічної будови за рахунок підвищення нерівноважної концентрації вакансій, що

впливає на механізм подальшої активної холодної деформації і дислокаційну субструктуру, яка формується, не тільки за рахунок нерівноважної концентрації вакансій, але і за рахунок істотного зменшення розміру зерна.

Спільними для цих розглянутих варіантів є необхідність швидкісних нагрівів і охолодження, а також регламентація значень тимчасового інтервалу між закінченням охолодження і початком активної холодної деформації.

2. Другим способом легування об'єкта нерівноважною концентрацією вакансій є здійснення деформаційного впливу шляхом циклічної деформації, заснованої на збільшенні значень нерівноважної концентрації вакансій внаслідок особливостей дислокаційного механізму циклічної деформації. В одному технологічному потоці

можливе використання обох способів в залежності від структурного стану об'єкта, його технологічної форми (заготовка виробу) і очікуваного ефекту.

Технологічними параметрами використаних типів циклічної деформації є: схема навантаження, амплітуда, частота і кількість циклів. Важливим є тимчасовий зв'язок між технологічною операцією активної холодної деформації і технологічною операцією легування нерівноважною концентрацією вакансій.

В даному проекті передбачаються наступні варіанти зазначеного вище зв'язку:

А. Технологічна операція легування нерівноважною концентрацією вакансій передують технологічна операція - активна холодна деформація, реалізується при використанні технологічної операції легування нерівноважною концентрацією вакансій шляхом того чи іншого типу вакансійного гарту;

Б. Технологічна операція легування нерівноважною концентрацією вакансій здійснюється після технологічної операції активної холодної деформації. Як правило, тут використовується технологічна операція легування нерівноважною концентрацією вакансій способом циклічної деформації.

Використання схеми Б може бути корисним для заготовки, якщо вона деформується на задану ступінь деформації шляхом дрібних деформацій.

В. Технологічна операція легування нерівноважною концентрацією вакансій поєднується з технологічною операцією активної холодної деформації. Тут також використовується спосіб циклічної деформації.

Найбільш часто схема Б використовується для зміцнення активною холодною деформацією заготовки перед технологічною операцією активної холодної деформації формування геометрії виробу, а також після цієї технологічної операції, тобто на готовому по геометрії виробі (часто в комплексі релаксаційно-стабілізуючої обробки). В цілому технологічні операції легування нерівноважною концентрацією вакансій дають наступні основні ефекти:

1. Зменшення опору активній холодної деформації.

2. Отримання заданої дислокаційної субструктури при менших ступенях деформації.

3. Забезпечення необхідної технологічної пластичності зміцненої активною холодною деформацією заготовки для подальшої технологічної активної холодної деформації, яка формує геометрію виробу.

4. Формування структурного стану готового виробу з заданими властивостями, досить стабільними під різними впливами при експлуатації.

Ці перераховані вище досить незвичайні ефекти підтверджені при активній холодної деформації після вакансійного гарту технічного

заліза, низьковуглецевої сталі і аустенітної сталі і були більш чітко виражені для перших об'єктів (внаслідок істотно більшої енергії дефектів пакування в α -Fe в порівнянні з γ -Fe). 5-10%-ва деформація розтягуванням технічного заліза в описаних вище умовах приводила до отримання дислокаційної субструктури, подібної до тієї, яка формується в звичайних умовах при 30 ... 40%-ній деформації. Ймовірно, що деформація в умовах наявності в металі нерівноважної концентрації вакансій забезпечувала меншу величину запасової пружної енергії, оскільки поряд зі зміцненням заліза до значення межі плинності ~ 700 МПа температура холодноламкості знизилася до -60 ... -70 °C. Зазначена деформація нормалізованого заліза підвищувала температуру холодноламкості в порівнянні з нормалізованим станом до $+10$... $+30$ °C при істотно меншому значенні межі плинності 250 ... 300 МПа [5, 15].

При оптимізації схеми деформування або комбінації таких схем, а також операцій легування нерівноважною концентрацією вакансій забезпечується стабілізація структурного стану сталевих виробів, зміцненого холодною деформацією. Це виражається в підвищеному опорі деградації структурного стану в умовах різних термомеханічних експлуатаційних впливів [16-21]. Зафіксовано зменшення швидкості розміцнення при нагріванні, що підвищує вогнезбереженість виробів при пожежах, а також підвищення опору втомному руйнуванню не тільки основного металу, але і зварних з'єднань [21]. Тут слід підкреслити, що звичайні поширені види термічного зміцнення сталі не дають такого ефекту. Якщо порівнювати деякі можливі аналоги з комплексом одержаних властивостей зміцнених холодною деформацією сталевих виробів, то найбільш близький комплекс властивостей виробів, які зміцнюються високотемпературною термомеханічною обробкою (high-temperature thermomechanical processing). При цьому слід врахувати складність технологічних операцій високотемпературної термомеханічної обробки, всі зазначені раніше недоліки термічних впливів і необхідність, як правило, використання легованих сталей.

Технології отримання сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією, можна розділити на кілька типів залежно від:

1) ролі технологічної деформаційної операції формозміни з додаванням виробу остаточної геометрії в кінцевому комплексі властивостей виробу,

2) можливість введення етапу попереднього зміцнення сталевих заготовки перед технологічною операцією формозміни,

3) співвідношення ступеню зміцнення заготовки та ступеню зміцнення при необхідній формозміні,

4) використання або невикористання технологічної операції легування вакансіями, змісту

цих технологічних операцій і їх місці в технологічному процесі,

5) наявності або відсутності технологічної операції релаксаційного типу готових, зміцнених холодною деформацією сталевих виробів.

Проведений аналіз існуючих технологій отримання сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією: холоднодеформованої арматури і кріпильних виробів за технологією холодного об'ємного штампування та інших показує, що тільки технологію отримання арматури можна віднести до технологій отримання сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією. У цій технології основне зміцнення отримує заготовка перед нанесенням періодичного профілю. Тут найбільш перспективним може бути легування вакансіями шляхом гарту перед активною холодною деформацією і легування вакансіями готового холоднодеформованого виробу шляхом циклічної деформації.

Існуюча технологія отримання холоднодеформуємих кріпильних виробів може бути віднесена до обговорюваних технологій тільки за умови отримання більшого рівня зміцнення готових виробів за рахунок зміцнення заготовки холодною деформацією при збереженні технологічної пластичності для холодного об'ємного штампування. При цьому, як загальне положення для всіх холоднодеформованих сталевих виробів з високим рівнем зміцнення є необхідність піддавати їх релаксаційній стабілізуючій обробці з метою усунення небезпеки крихкого руйнування і деформаційного старіння.

Підводячи підсумок специфічним особливостям технології отримання сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією, можна зробити висновок, що вони в основному полягають:

1) в специфіці технологічних операцій зміцнення і їх параметрів;

2) в тісному зв'язку технологічної операції зміцнення з формоутворенням готових виробів;

3) в поєднанні деформаційних технологічних операцій зміцнення і знеміцнення і їх послідовності, в «структурному змісті» технологічної операції знеміцнення;

4) в новій металофізиці формування структурного стану виробів, що зміцнюються холодною деформацією;

5) у використанні гартувань нового типу (вакансійних), що призводять не до зміцнення і зниження пластичності, але, навпаки, підвищують технологічну пластичність.

Зміст технологічних операцій і обладнання для їх реалізації в технологіях отримання сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією, заснований на нових металофізичних принципах, можна представити наступним чином (Таблиця 1).

Таблиця 1. Зміст технологічних операцій (ТО) і обладнання для їх реалізації в технологіях отримання сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією

№	Зміст ТО	Необхідне обладнання
1	Активна холодна деформація заготовки	1.1. При схемі деформації одного типу - пристрої для: одночасного розтягу, волочіння, прокатки, всебічного нерівномірного стиснення. 1.2. При використанні послідовно різних схем деформації: агреговані в одному пристрої пристрої, що деформують за вказаними вище схемами, крім всебічного стиснення.
2	Активна холодна деформація для отримання виробу заданої геометрії	Відповідний деформуючий пристрій
3	Легування об'єкта нерівноважною концентрацією вакансій	Низькочастотний індуктор; водяний спрейер. Пристрій циклічного знакозмінного згину
3а	Після активної холодної деформації	Те ж – кручення Те ж – вібрації
3б	Під час активної холодної деформації	Вібруюча волока при волочінні, вібруючі валки при прокатці. Створення деформацій розтяг-стиснення в очагу деформації при прокатці.
4	Подрібнення зерна матриці і легування об'єкта нерівноважною концентрацією вакансій до початку активної холодної деформації	Агрегований деформуючий пристрій по п.1.2 Низькочастотний індуктор Спрейер, що обертається
5	Отримання специфічної дислокаційної структури і мікроструктури шляхом активної холодної деформації ультра дрібнозернистої сталі в умовах високої нерівноважної концентрації вакансій	Деформуючі пристрої згідно пункту 1.1 або 1.2

Базуючись на нових принципах отримання сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією, розроблено кілька варіантів відповідних технологічних схем:

Варіант I:

1) вхідний контроль заготовки; 2) активна холодна деформація заготовки за однією схемою; 3) циклічна деформація; 4) активна холодна деформація з отриманням готового виробу за схемою формозміни заготовки; 5) циклічна деформація холоднодеформованого виробу; 6) здавальний контроль властивостей і сертифікація виробу.

Варіант II:

аналогічний варіанту I за винятком технологічної операції 2), коли активна холодна деформація здійснюється шляхом чередування схем деформації в певній послідовності.

Варіант III:

аналогічний варіанту I, але з суміщенням 2) і 3) технологічних операцій в одну 2-3, коли активна холодна деформація і циклічна деформація заготовки здійснюється одночасно.

Варіант IV:

має принципову відмінність від раніше розглянутих варіантів I, II і III за рахунок включення технологічної операції термічного впливу на заготовку шляхом її вакансійного гарту з отриманням одночасно істотного подрібнення зерна і нерівноважної концентрації вакансій: 1) вхідний контроль заготовки; 2) активна холодна деформація по типу ТО 2) у варіанті II з більшим сумарним ступенем дефор-

мації; 3) швидкісний нагрів в низькочастотному індукторі до температур 650 ... 700°C (швидкісна рекристалізація) без витримки при зазначених температурах; 4) швидкісне охолодження в обертовому спрейері для фіксації дрібного зерна матриці (одержаного при швидкісній рекристалізації деформованої з великим ступенем холодної деформації сталі (не менше 70%) (розмір зерна до 9-10 балів) і необхідної нерівноважної концентрації вакансій (див. вище); 5) активна холодна деформація заготовки по одній схемі зі ступенем деформації 10 ... 40%, оптимальне значення якої визначається в серії попередніх експериментів, що в сукупності призводить до дислокаційної фрагментації матриці в межах зерен зазначеного вище розміру і, таким чином, формує матрицю (ферит), яка диспергована на двох розмірних рівнях. Раніше нами було показано, що описане диспергування матриці на кожному з використовуваних розмірних рівнях сприятливо впливають на рівень холодостійкості в холоднодеформованому і потім у зістареному стані. Тому, якщо ступінь деформації заготовки при технологічній деформації отримання готового виробу порівняно мала (як, наприклад, нанесення періодичного профілю при отриманні холоднодеформованої арматури), то така технологічна операція 6) проходить безпосередньо за технологічною операцією 5), а потім технологічна операція 7) циклічна деформація готового холоднодеформованого виробу і, нарешті, технологічна

операція 8) здавальний контроль властивостей і сертифікація виробу.

Якщо ж деформація заготовки при технологічній операції 6) досить велика, то виникає варіант V, що відрізняється від варіанту IV введенням технологічної операції 6) циклічної деформації холоднодеформованої заготовки по режиму технологічної операції 5) і тільки потім має місце технологічна операція 7) холодна деформація, пов'язана з отриманням виробу заданої геометрії, технологічна операція 8) циклічна деформація готового виробу і технологічна операція 9) здавальний контроль і сертифікація виробу.

Таким чином, можна говорити про п'ять варіантів технологічних схем отримання сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією, заснованих на нових принципах отримання структурного стану сталі при використанні холодної деформації. У той же час для всіх розроблених варіантів може використовуватися єдиний підхід як для оперативного контролю структурного стану заготовки в ході технологічного процесу, так і 100% -ного неруйнівного контролю властивостей готових виробів. Детальний розгляд принципів застосування і організації зазначених видів контролю виходить за рамки даної статті і є предметом окремої розмови, аналізу і використання, в тому числі підготовки заявок на отримання патентів.

У даній статті тільки обґрунтовується можливість тих чи інших методів контролю і ефекти їх застосування для розробляємих технологій отримання сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією.

Метод контролю зміни структурного стану деформованого металу заснований на аналізі спектрограм ультразвукової емісії деформованого об'єкта і порівняні еталонних «сприятливих» спектрограм з поточними, що одержуються безпосередньо в конкретному випадку деформування, причому відображає як процеси накопичення дислокацій в металі, так і утворення мікротріщин [22].

Використання методу дозволяє індивідуалізувати обробку об'єктів даної партії, зменшити дисперсію властивостей виробів в даній партії, вивести з технологічного процесу об'єкти, що потенційно дають браковані вироби і, таким чином, збільшити вихід придатного.

Для виробів, що зміцнюються холодною деформацією, як готових, так і тих, що знаходяться в технологічному процесі (як заготовки), показано різноманітне використання вимірювань коерцитивної сили - характеристики, що залежить не тільки від щільності, але і від об'ємного розподілу дислокацій [23, 24] і як основа одержуваних кореляційних залежностей між механічними властивостями і коерцитивної силою, що забезпечує оперативний неруйнівний контроль властивостей, як протягом техпроцесу, так і готових виробів, що збільшує також вихід придатного і забезпечує не вибіркового руйнівний, а 100% -ний контроль властивостей го-

тових виробів з помітною економією металу та інших ресурсів.

Зміст здавального контролю готових сталевих виробів, що одержані за проектом розробляємої технології

Для забезпечення неруйнівного контролю властивостей готових виробів необхідно, як відомо, провести натурні випробування з отриманням чималих вибірок характеристик готових виробів (їх механічних і фізичних властивостей), тому нижче наводиться загальна методика їх визначення.

Здавальні випробування холоднодеформованих виробів, отриманих як за відомими технологіями, так і за новими варіантами, що розробляються, мають свою специфіку. Звичайні характеристики опору пластичної деформації при одновісьному розтягуванні із записом технічної діаграми деформації і руйнування і обліку її характеру визначаються відомим способом. Відомими способами визначаються і характеристики опору крихкому руйнуванню: ударна в'язкість при різних температурах і параметр в'язкості руйнування - тріщиностійкість K_1 . При таких випробуваннях необхідно дотримуватися вимогам: максимальне наближення масивності випробовуваних об'єктів до масивності самих виробів. Розроблено і нові підходи до визначення характеристик опору в'язкому руйнуванню, важливість яких зростає зі зменшенням поперечного перерізу виробів, коли збільшується небезпека в'язкого руйнування по крихкому типу [25].

У систему здавальних випробувань вводиться, напевно, вперше визначення запасової пружної енергії, яка є функцією сформованого цією технологією структурного стану готового виробу Q_y^T . Значення Q_y^T при експлуатації сумується з пружною енергією, пов'язаною з рівнем експлуатаційних навантажень $Q_y^{екс}$ (якщо релаксація її не суттєва). Гранично допустиме значення цієї сумарної енергії ΣQ_y не повинно перевищувати допустимого, при якому і вище якого статистично вірогідне зростання дефектів (тріщин) до їх критичних розмірів. Методика і необхідне обладнання для визначення значень Q_y^T в цій статті не розглядається (тема окремого повідомлення), а значення $Q_y^{екс}$ є заданим.

Визначення схильності до деформаційного старіння для холоднодеформованих виробів має свою специфіку, яка частково висвітлена в роботі [26]. Тут відзначимо лише основні відмінності від стандартної:

1. Ступінь і схема холодної деформації не є фактично умовними, а задані параметрами деформації для отримання холоднодеформованого об'єкта-виробу.
2. Деформаційне старіння має здійснюватися як деформаційне старіння під напругою (виходячи з умов експлуатації виробу), тривалість і температура встановлюються у міру накопичення відповідної статистики для виробів даного класу.
3. Така ж статистика потрібна для визначення допустимих значень властивостей деформаційно-

зістареного виробу, при яких сам процес деформаційного старіння виробу в процесі експлуатації в заданому часовому інтервалі не веде до втрати несучої здатності виробу.

4. Ясно також, що деформаційне старіння холоднодеформованого виробу за описаною схемою і його результати тісно пов'язані з можливістю регулювання схильності до деформаційного старіння в той чи інший спосіб [26-28].

Нижче на рис.1 наведені в графічній формі розроблені варіанти технологічних схем отримання сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією, з використанням нових принципів формування структурних станів з високою щільністю лінійних і двовимірних дефектів кристалічної будови.

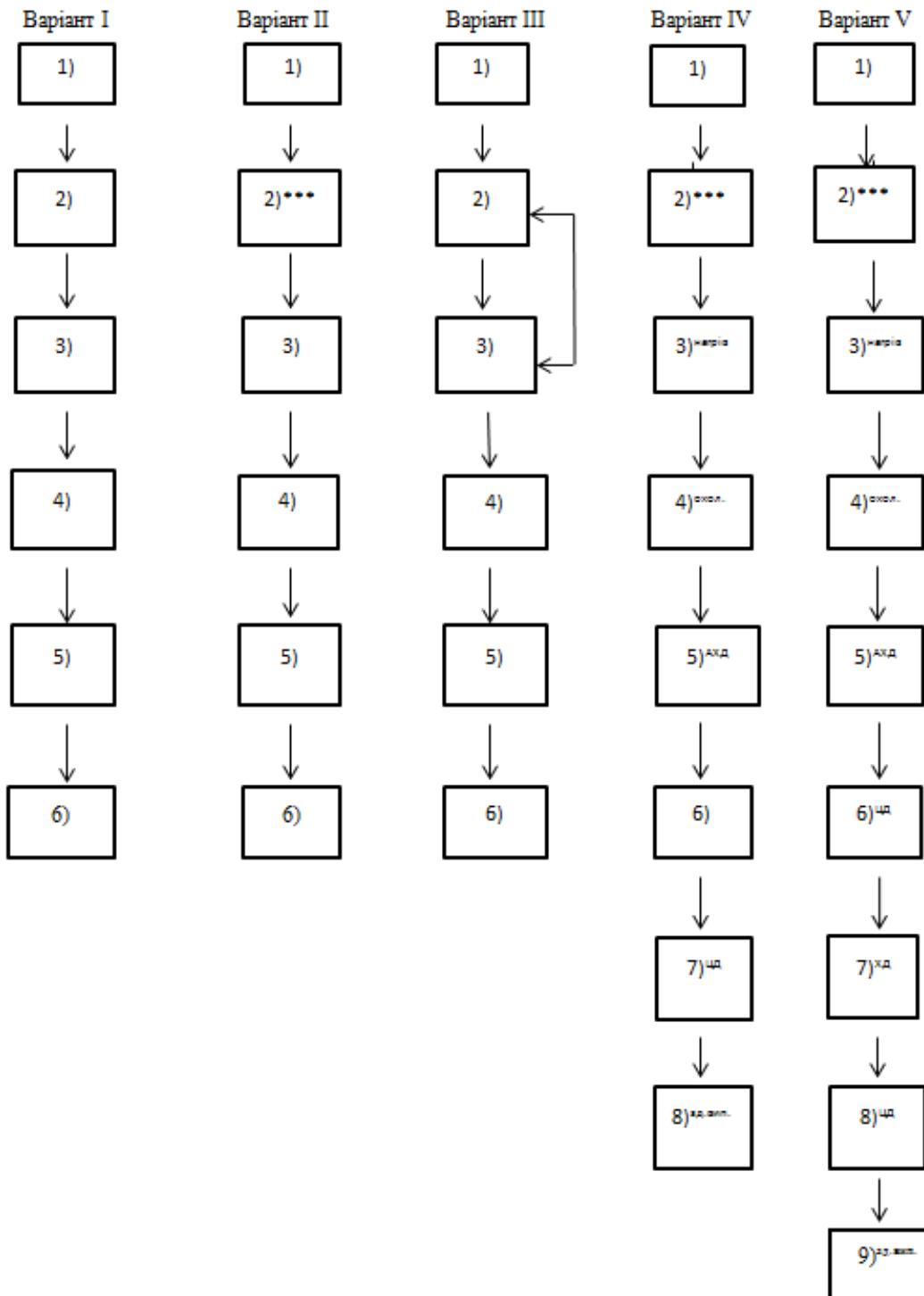


Рисунок 1. Варіанти технологічних схем*) отримання сталевих виробів, що зміцнюються холодною деформацією

Умовні позначення:Варіант I:

1) вхідний контроль заготовки; 2) активна холодна деформація заготовки за однією схемою; 3) циклічна деформація; 4) активна холодна деформація з отриманням готового по геометрії виробу за схемою формозміни заготовки; 5) циклічна деформація холоднодеформованого виробу; 6) здавальний контроль властивостей і сертифікація виробу.

Варіант II:

1) вхідний контроль заготовки; 2) ^{***}) активна холодна деформація заготовки шляхом чергування різних схем деформації в певній послідовності; 3) циклічна деформація; 4) активна холодна деформація з отриманням готового по геометрії виробу за схемою формозміни заготовки; 5) циклічна деформація холоднодеформованого виробу; 6) здавальний контроль властивостей і сертифікація виробу.

Варіант III:

1) вхідний контроль заготовки;
2)
3)
- активна холодна деформація заготовки з суміщенням її з циклічною деформацією;
4) активна холодна деформація з отриманням готового по геометрії виробу за схемою формозміни заготовки; 5) циклічна деформація холоднодеформованого виробу;
6) здавальний контроль властивостей і сертифікація виробу.

Варіант IV:

1) вхідний контроль заготовки;
2) ^{***} - інтенсивна активна холодна деформація заготовки з використанням різних схем деформації в певній послідовності;
3) ^{нагрів.} - швидкісний нагрів холоднодеформованої заготовки;
4) ^{охол.} - гартівне охолодження;
5) ^{АХД} - активна холодна деформація «загартованої» заготовки;
6) активна холодна деформація з отриманням готового по геометрії виробу за схемою формозміни заготовки;
7) ^{ЦД} - циклічна деформація холоднодеформованого виробу;
8) ^{зд. випр.} - здавальні випробування і сертифікація виробу.

Варіант V:

1) вхідний контроль заготовки;
2) ^{***} - інтенсивна активна холодна деформація заготовки з використанням різних схем деформації в певній послідовності;
3) ^{нагрів.} - швидкісний нагрів холоднодеформованої заготовки;
4) ^{охол.} - гартівне охолодження;
5) ^{АХД} - активна холодна деформація «загартованої» заготовки;
6) ^{ЦД} - циклічна деформація;
7) ^{ХД} - активна холодна деформація з отриманням готового по геометрії виробу за схемою формозміни заготовки;
8) ^{ЦД} - циклічна деформація холоднодеформованого виробу;
9) ^{зд. вип.} - здавальні випробування і сертифікація виробу.

⁾ Примітка: див. текст на стор. 15-17.

Висновки

Порівняльний аналіз відомих технологій отримання зміцнених сталевих виробів при використанні способів термічного зміцнення і способів деформаційно-термічних (термомеханічних) показує, що розроблена технологія вигідно відрізняється використанням, переважно тільки одного типу зміцнення - деформаційного, що дає: кращу логістику і екологію за рахунок виключення технологічних операцій високотемпературного нагрівання і швидкісного охолодження; здешевлює заготовку, так як холодна деформація не вимагає легування; тут можна говорити про заготовку універсальну для багатьох типів виробів, що одержуються холодною деформацією. Нову технологію в порівнянні з відомими цілком можна віднести до енергозберігаю-

чих за питомими енерговитратами, особливо якщо врахувати можливість зниження опору холодній деформації і її ступеню. Істотною перевагою нової технології, як уже зазначалося вище, є принципова можливість організації оперативного контролю процесу формування структурного стану заготовки і готового виробу з організацією 100% -го неруйнівного контролю їх властивостей (збільшення виходу придатного, зменшення витрати металу). Значні переваги, як по витраті енергії, так і за властивостями виробу дає поєднання технологічної деформації формозміни з додатковим зміцненням виробу і можливістю додання виробу форми, при якій реалізуються принципи геометрично-структурного зміцнення [14]. Отримання виробу точних розмірів з малою шорсткістю поверхні до-

датково підвищує його експлуатаційну надійність, а отриманий структурний стан - підвищення однієї з найважливіших експлуатаційних характеристик - опору циклічним навантаженням [21].

Якщо викласти переваги нової технології в стислій формі, то вони такі:

• по самій технології:

а) найкраща логістика, менша енергоємність, краща екологія, дешева заготовка і кінцевий продукт; б) поєднання операції формозміни з додатковим зміцненням; в) більш ефективна система оперативного контролю технологічного процесу і 100% -ний неруйнівний контроль властивостей готових виробів;

• по виробу:

а) стабільний новий для холоднодеформованих виробів комплекс властивостей; б) точність розмірів; в) чистота поверхні.

У відомих способах зміцнення сталевих виробів відповідний структурний стан формується найчастіше шляхом термічних впливів, що призводять до тих чи інших фазових і структурних перетворень. У той же час при експлуатації ці вироби піддаються переважно деформаційним впливам. У виробках, отриманих за новою технологією, їх структурний стан формується деформаційним впливом, тобто впливом того ж типу, що і при експлуатації. Це дозволяє говорити про їх більшу експлуатаційну надійність, в тому числі і при циклічному навантаженні.

Перелік використаних джерел

1. Одесский П.Д., Ведяков И.И. Сталь в строительных металлических конструкциях. М.: Metallurgizdat, 2018, 906 с.
2. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов / Под ред. Акад. В.И.Трефилова. – Киев: Наукова думка, 1987. – 246с.
3. Гуль Ю.П., Лещенко А.Н., Пилипенко В.Ю. Принципы новой технологии получения металлических материалов с повышенной термомеханической стабильностью свойств на основе формирования регламентированной структуры с использованием кинетических и термодинамических свойств закалочных и деформационных вакансий. Синергетика. Новые технологии получения и свойства металлических материалов (Тезисы докладов 2-го Всесоюзного симпозиума). Часть 1. М.АН СССР, 1991, с.17.
4. Гуль Ю.П., Чмелева В.С. Вакансионное легирование металлов. Металлознавство та термічна обробка металів, 2001, №1-2, С.32-53.
5. Гуль Ю.П. Деформационные воздействия в технологиях термической и комбинированных обработок. «Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов, вып. 58. Дн-ск, ПГАСА, 2011, с.157-177.
6. Гуль Ю.П. Теоретические и технологические основы термомеханико-термической обработки. «Металлургия и коксохимия». Респ. межведомственный сб. Київ: Техніка, 1987, вип.92. С.7-13.
7. В.В.Калиновский, М.Б.Лазарева, Д.Г.Малыхин, А.В.Мац и др. Влияние различных видов деформации на физико-механические свойства ГПУ и ГЦК металлов и сплавов. Успехи физики металлов. 2015, т.16, С.61-84.
8. Гуль Ю.П., Карнаух А.И. Дислокационная структура и хладостойкость низкоуглеродистой стали. Известия АН СССР. Металлы, 1975, №3. С.140-146.
9. Гуль Ю.П., Карнаух А.И. Тип ячеистой структуры и хладостойкость закаленной и деформированной низкоуглеродистой стали. «Применение в металлостроении просвечивающей и растровой электронной микроскопии». М.: Московский дом научно-технической пропаганды, 1976. С.216-217. ПГАСА.
10. Мак Лин Д. Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1965, 426 с.
11. Штремель А.М. Прочность сплавов (в 2-х частях) М.: МИСИС, 1997, 1999. 384+527 с.
12. Гуль Ю.П., Шукис И.З. Влияние деформационного старения на упрочнение и охрупчивание термомеханикотермически упрочненного проката. «Производство термически упрочненного проката». Сб. М.: Металлургия, 1986, с.2-25.
13. Гуль Ю.П., Рабухина Р.Я., Белогорцева И.Ю. Ударная вязкость деформационно-состаренной широкополосной стали в зависимости от раз мера ферритного зерна. Термическая обработка проката (сборник). М.: Металлургия, 1983, с.64-66.
14. Гуль Ю.П. Основные принципы и практика геометрически-структурного упрочнения металлоизделий. Сталь, 2012, №8, с.40-45.
15. Гуль Ю.П., Пилипенко В.Ю. Роль вакансионной закалки при термопластическом упрочнении сталей аустенитного класса. Известия АН СССР. Металлы, 1990, №4, с. 77-83.
16. Блантер М.Е, Горелик С.С. Образование вакансий при рекристаллизации. Известия АН СССР, Металлы, 1982, 32, с.90-93.
17. Гуль Ю.П., Перчун Г.И. Стабилизация упрочненного состояния холоднодеформированной низкоуглеродистой стали// МиТОМ. – 1992, №2. С. 26-30.
18. Гуль Ю.П., Лещенко А.Н., Перчун Г.И. Стабилизация субструктурного упрочнения в сплавах на на железной основе. Металлофизика, Наукова думка (Киев), Т.13, №9, С.106-113.
19. Гуль Ю.П., Лещенко А.Н., Левченко И.Л. Субструктурное упрочнение стали с использованием вакансионной закалки. «Субструктурное упрочнение металлов». Материалы докладов 4-й Республиканской конференции. Киев, институт металлофизики АН УССР, 1990, с.15-16.
20. Гуль Ю.П., Ивченко А.В. Стабилизированная холоднодеформированная арматура с повышенной пластичностью. Бетон и железобетон – Пути развития. Научные труды 2-ой Всероссийской международной конференции по бетону (5-9 сентября 2005г.). Москва, Т.5, М.: Дипак, 2005, с.372-374.

21. Гуль Ю.П., Миронова О.Ю., Перчун Г.И. Субструктурное упрочнение низкоуглеродистой стали с комбинацией схем деформации. «Субструктурное упрочнение металлов». Материалы докладов 4-й Республиканской конференции. Киев, институт металлофизики АН УССР, 1990, с.24-25.
22. Бовенко В.Н. Закономерности автоакустической эмиссии при деформации металлических кристаллов. Изв. АН СССР. Металлы, 1984, №1, С.129-137.
23. Гуль Ю.П., Рабухина Р.Я. Релаксация напряжений и склонность к хрупкому разрушению горячедеформированных и деформационно-состаренных сталей. Изв. Вузов. Черная металлургия, 1982, №10. С.101-104.
24. Гуль Ю.П., Рабухина Р.Я. Релаксация напряжений и хладноломкость деформационно-состаренной стали. Термическая обработка металлов. Сборник. М.: Металлургия, 1979, №8, с.71-73.
25. Гуль Ю.П., Ивченко А.В., Кондратенко П.В. Чмелева В.С., Перчун Г.И. Характеристики макролокализации пластической деформации при одноосном растяжении стальных объектов и их сопротивление вязкому разрушению //Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научных трудов, вып.89 /ЛГАСА, 2016, Днепропетровск, 2016.– с.70-76.
26. Гуль Ю.П., Ивченко А.В., Моргун М.П., Кондратенко П.В. Методики определения и способы снижения склонности стальных изделий к деформационному старению. Металлургическая и горнорудная промышленность, 2017, с.17-21.
27. Гуль Ю.П. Концепция эффективной концентрации примесных атомов внедрения при деформационном старении стали. Часть 1. Метизы (Спец. журнал), 2007, №3 (16), с.42-49.
28. Гуль Ю.П. Физические аспекты охрупчивания деформационно-состаренной стали./Тезисы докладов IX Всесоюзной конференции «Физика разрушения». Часть 1. Изд. института проблем прочности АН УССР (Киев), 1980, с.171-172.

REFERENCES

1. Odesskii P.D., VEDIKOV I. I. (2018) *Stal v stroitelnykh metallicheskiykh konstruktsiyakh* [Steel in construction metal structures]. M.: Metallurgizdat. 906 p.
2. Academician V. I. Trefilov (Ed.) (1987) *Deformatsionnoe uprochnenie i razrushenie polikristallicheskiykh metallov* [Deformation hardening and destruction of the polycrystalline metals]. Kiev: Naukova dumka. 246 p.
3. Gul Yu. P., Leshchenko A. N., Pilipchenko V. Yu. (1991) Printsipy novoy tekhnologii polucheniya metallicheskiykh materialov s povyshennoy termomekhanicheskoy stabilnostyu svoystv na osnove formirovaniya reglamentirovannoy struktury s ispolzovaniem kineticheskikh i termodinamicheskikh svoystv zakalochnykh i deformatsionnykh vakantsii. Sinergetika. Novye tekhnologii polucheniya i svoystva metallicheskiykh materialov. Chast 1 [Principles of a new technology for the production of metal materials with enhanced thermomechanical stability of properties based on the formation of a regulated structure using the kinetic and thermodynamic properties of quenching and deformation vacancies. Synergetics. New production technologies and properties of metallic materials. Part 1], Tezisy dokladov 2-go Vsesoyuznogo simpoziuma [Abstracts of the 2nd All-Union Symposium]. M.: AN SSSR. p. 17.
4. Gul Yu. P., Chmелеva V. S. (2001) Vakantsionnoye leirovaniye metallov [Vacancy alloying of metals]. *Metalozn - vstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metallurgy and heat treatment of metals]. No 1-2, p.p. 32-53.
5. Gul Yu. P. (2011) Deformatsionnye vozdeystviya v tekhnolohiyakh termicheskoy i kombinirovannykh obrabotok [Deformation effects in heat and combined treatment technologies]. In *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinoostroenie: Sb. nauchn. trudov, vyp. 58* – Construction, Material Science, Mechanical Engineering: Collection of Scientific Papers, Issue 58 (p.p. 157-177). Dnepropetrovsk: PHASA.
6. Gul Yu. P. (1987) Teoreticheskie i tekhnolohicheskie osnovy termomekhaniko-termicheskoy obrabotki [Theoretical and technological fundamentals of thermomechanical-and-heat treatment]. In *Metallurhiya i koksokhimiya. Resp. mezhvedomstvennyi sb. – Metallurgy and coke chemistry. Rep. interdepartmental collection*, Issue 92 (p.p. 7-13). Kyiv: Tekhnika.
7. V. V. Kalinovskii, M. B. Lazareva, D. H. Malykhin, A. V. Mats and others (2015) Vliyanie razlichnykh vidov deformatsii na fiziko-mekhanicheskie svoystva HPU i HTsK metallov i splyavov [The influence of the various types of deformation on the physical and mechanical properties of HCP and FCC of metals and alloys]. In *Uspekhi fiziki metallov – Advances in Metal Physics (Vol. 16, p.p. 61-84)*.
8. Gul Yu. P., Karnaukh A. I. (1975) Dislokatsionnaya struktura i khladostoykost nizkouglerodistoy stali [Dislocation structure and cold resistance of the low-carbon steel]. *Izvestiya AN SSSR. Metallurgy – Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Metals*, No 3, p.p. 140-146.
9. Gul Yu. P., Karnaukh A. I. (1976) Tip yacheystoi struktury i khladostoykost zakalennoi i deformirovannoi nizkouglerodistoy stali [Type of cellular structure and cold resistance of the hardened and deformed low-carbon steel]. In *Primeneniye v metallovedenii prosvetichivayushchei i rastrovoy elektronnoy mikroskopii – The use of the transmission and scanning electron microscopy in metallurgy* (p.p. 216-217). M.: Moskovskii dom nauchno-tekhnicheskoy propahandy, PHASA.
10. Mak Lin D. (1965) *Mekhanicheskie svoystva metallov* [Mechanical properties of metals]. M.: Metallurhiya. 426 p.
11. Shtremel A.M. (1997, 1999) *Prochnost splyavov [Strength of alloys]* (Vol. 1-2). M.: MISIS. 384, 527 p.
12. Gul Yu. P., Shukis I. Z. (1986) Vliyanie deformatsionnoho starenia na uprochnenie i okhrupchivaniye termomekhaniko-termicheski uprochnennoho prokata [The effect of deformation aging on hardening and embrittlement of the thermomechanically heat hardened rolled products]. In *Proizvodstvo termicheski uprochnennoho prokata. Sb. – Production of heat-hardened rolled products. Coll.* (p.p. 2-25). M.: Metallurhiya.
13. Gul Yu. P., Rabukhina R. Ya., Belohortseva I. Yu. (1983) Udarnaia viazkost deformatsionno-sostarennoi shirokopolosnoi stali v zavisimosti ot razmera ferritnoho zerna [The impact ductility of deformation aged wide flat

- steel depending on the size of ferrite grain]. In *Termicheskaia obrabotka prokata (sbornyk) – Heat treatment of the rolled metal (collection)*. (p.p. 64-66). M.: Metallurhiia.
14. Gul Yu. P. (2012) Osnovnye printsipy i praktika geometricheski-strukturnogo uprochneniia metalloizdelii [The basic principles and practice of the geometric and structural hardening of metal products]. *Stal [Steel]*. No 8, p.p. 40-45.
 15. Gul Yu. P., Leshchenko A. N., Pilichenko V. Yu. (1990) Rol vakansionnoi zakalki pri termoplasticheskom uprochnenii stali austenitnogo klassa [The role of the vacancy hardening in the thermoplastic hardening of austenitic steels]. *Izvestiia AN SSSR. Metallurgy – Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Metals*, No 4, p.p. 77-83.
 16. Blanter M. E., Horelik S.S. (1982) Obrazovanie vakansii pri rekristallizatsii [The formation of vacancies during recrystallization]. *Izvestiia AN SSSR. Metallurgy – Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Metals*, No 32, p.p. 90-93.
 17. Gul Yu. P., Perchun G. I. (1992) Stabilizatsiia uprochnennoho sostoianniia kholodnodeformirovannoi nizko-?hlerodistoi stali [Stabilization of the strengthened state of the cold-worked low-carbon steel]. *MeTOM – MechHToM*, No 2, p.p. 26-30.
 18. Gul Yu. P., Leshchenko A. N., Perchun G. I. Stabilizatsiia substrukturnogo uprochneniia v splavakh na zheleznoi osnove [Stabilization of the substructural hardening in iron-based alloys]. In *Metallofizika – Metallophysics (Vol. 13, No 9, p.p. 106-113)*. Kiev: Naukova dumka.
 19. Gul Yu. P., Leshchenko A. N., Levchenko I. L. (1990) *Substrukturnoe uprochnenie stali s ispolzovaniem vakansionnoi zakalki. Substrukturnoe uprochnenie metallov [Substructural strengthening of steel using the vacancy hardening. Substructural strengthening of metals]*, Materialy 4y Respublikanskoi konferentsiii [Materials of the 4th Republican Conference]. Kiev: institut metallofiziki AN USSR, p.p. 15-16.
 20. Gul Yu. P., Ivchenko A. V. (2005) *Stabilizirovannaia kholodnodeformirovannaia armatura s povyshennoi plastichnostiu. Beton i zhelezobeton – Puti razvitiia [Stabilized cold-worked reinforcement with increased ductility. Concrete and reinforced concrete – Course of development]*, Nauchnye trudy 2-i Vserossiiskoi mezhdunarodnoi konferentsii po betonu [Scientific Works of the 2nd All-Russian International Conference on Concrete] (Moscow, September 5-9, 2005) (Vol. 5, p.p. 372-374). M.: Dipak.
 21. Gul Yu. P., Mironova O. Yu., Perchun G. I. (1990) *Substrukturnoe uprochnenie nizkouhlerodistoi stali s kombinatsiei skhem deformatsii. Substrukturnoe uprochnenie metallov [Substructural hardening of low-carbon steel with a combination of deformation schemes. Substructural hardening of metals]*, Materialy dokladov 4-i Respublikanskoi konferentsii [Materials of the reports of the 4th Republican Conference]. Kiev: institut metallofiziki AN USSR, p.p. 24-25.
 22. Bovenko V. N. (1984) Zakonomernosti avtoakusticheskoi emissii pri deformatsii metallicheskih kristallov [Regularities of the autoacoustic emission during the deformation of metal crystals]. *Izvestiia AN SSSR. Metallurgy – Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Metals*, No 1, p.p. 129-137.
 23. Gul Yu. P., Rabukhyna R. Ya. (1982) Relaksatsiia napriazhenii i sklonnost k khрупkomu razrusheniiu horiachedeformirovannykh i deformatsionno-sostarennykh stali [The relaxation of stresses and tendency to brittle fracture of the hot-worked and deformation aged steels]. *Chernaia metallurhiia [Ferrous metallurgy]*. No 10, p.p. 101-104.
 24. Gul Yu. P., Rabukhyna R. Ya. (1979) Relaksatsiia napriazhenii i khladnolomkost deformatsionno-sostarennoi stali [The relaxation of stresses and cold brittleness of the deformation aged steel]. In *Termicheskaia obrabotka metallov. Sbornik – Heat treatment of metals. Collection (No 8, p.p. 71-73)*. M.: Metallurhiia.
 25. Gul Yu. P., Ivchenko A. V., Kondratenko P. V., Chmeleva V. S., Perchun G.I. (2016) Kharakteristiki makro-?okalizatsii plasticheskoi deformatsii pri odnoosnom rastiiazhenii stalnykh obektov i ikh soprotivlenie viazkomu razrusheniiu [The characteristics of macrolocalization of the plastic deformation under uniaxial tension of steel objects and their resistance to ductile failure]. In *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie: Sb. nauchn. trudov, vyp. 89 – Construction, Material Science, Mechanical Engineering: Collection of Scientific Papers, Issue 89 (p.p. 70-76)*. Dnepropetrovsk: PHASA.
 26. Gul Yu. P., Ivchenko A. V., Morgun M. P., Kondratenko P. V. (2017) Metodiki opredeleniia i sposoby snizheniia sklonnosti stalnykh izdelii k deformatsionnomu stareniiu [The methods for determining and the ways of reducing the tendency of steel products to deformation aging]. In *Metallurhicheskaia y hornorudnaia promyshlennost – Metallurgical and mining industry (p.p. 17-21)*.
 27. Gul Yu. P. (2007) Kontseptsiiia effektivnoi kontsentratsii primesnykh atomov vnedreniia pri deformatsionnom starenii stali. Chast 1 [The concept of effective concentration of the interstitial impurities during the deformation aging of steel. Part 1]. *Metizy (Spets. zhurnal) [Metalware (Special Magazine)]*. No 3 (16), p.p. 42-49.
 28. Gul Yu. P. (1980) *Fizicheskie aspekty okhrupchivaniia deformatsionno-sostarennoi stali [Physical aspects of the embrittlement of deformation aged steel]*, Tezisy dokladov IX Vsesoiuznoi konferentsii "Fizika razrusheniia". Chast 1. [Theses of the reports of the IX All-Union Conference "Physics of Destruction". Part 1]. Kiev: institut problem prochnosti AN USSR, p.p. 171-172.

Стаття поступила: 07.06.2019