

**С. І. Губенко**<sup>1,2</sup>, д.т.н., проф., ORCID 0000-0001-6626-3979**Е. В. Парусов**<sup>1</sup>, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-4560-2043**І. М. Чуйко**<sup>1,\*</sup>, к.т.н., ст. досл., ORCID 0000-0002-4753-614X**О. В. Парусов**<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-9879-6179<sup>1</sup> *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*<sup>2</sup> *Український державний університет науки і технологій,**ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»*\* *Автор для листування: ferrosplav@ukr.net*

## ОСОБЛИВОСТІ ТРАНСФОРМАЦІЇ ГЕТЕРОФАЗНИХ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ ЗА ГАРЯЧОЇ ТА ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ СТАЛЕЙ. ЧАСТИНА 1

**Анотація.** Досліджено поведінку мікрокомполітичних гетерофазних включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» та «фази поруч» за гарячої та холодної прокатки сталей. Показано, що їх поведінка під час деформування пов'язана зі складною взаємодією складових фаз включень, а також взаємодією у системі міжфазних границь включення-матриця та внутрішніх міжфазних границь у включеннях. Встановлено, що досліджені включення характеризуються своїми закономірностями розвитку деформаційних процесів, що визначаються їх хімічним та фазовим складом, структурою, деформаційною здатністю фаз включень, температурою деформації. Встановлено взаємний вплив фаз включень на їх спільну деформацію під час гарячої та холодної прокатки сталей. Показано, що формозміна включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» за гарячої прокатки визначається рівнем пластичності фази-оболонки, а також складною взаємодією фаз внаслідок розвитку міжфазного тертя та проковзування. Укладання недеформованих включень оксидів, шпінелей, нітриду титану тощо у пластичну силікатну або сульфідну оболонку слід розглядати, як спосіб зниження крихкості неметалевих включень за гарячої прокатки. Формозміна включень «фази поруч» під час гарячої прокатки визначається рівнем пластичності фаз включення, а також складною взаємодією фаз внаслідок розвитку міжфазного тертя та проковзування (за наявності пластичної фази). Формозміна включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» під час холодної прокатки визначається рівнем пластичності сульфідної фази-оболонки, а також складною взаємодією фаз внаслідок розвитку міжфазного тертя та холодної проковзування уздовж міжфазних границь у включеннях. Формозміна включень «фази поруч» під час холодної прокатки визначається рівнем пластичності сульфідної фази включення (за її наявності), а також складною взаємодією фаз внаслідок

© С. І. Губенко, Е. В. Парусов, І. М. Чуйко, О. В. Парусов, 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

розвитку міжфазного тертя та холодного проковзування. Досліджена роль пластичних фаз у включеннях «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» та «фази поруч». Показано, що пластичні фази, а також міжфазні границі відіграють суттєву роль у процесах формозміни гетерофазних включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» та «фази поруч» під час гарячої та холодної прокатки сталей.

**Ключові слова:** сталь, гетерофазні неметалеві включення, тугоплавка фаза, легкоплавка оболонка, фази поруч, деформація, гаряча прокатка, холодна прокатка, пластичність, руйнування, міжфазні границі, міжфазне тертя.

**Посилання для цитування:** Особливості трансформації гетерофазних неметалевих включень за гарячої та холодної прокатки сталей. Частина 1 / С. І. Губенко, Е. В. Парусов, І. М. Чуйко, О. В. Парусов // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2026. Вип. 40. С. 56-78. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-004>

**Вступ.** Практика показує, що неметалеві включення часто відіграють визначальну роль під час зародження руйнування деталей та конструкцій, і навіть негативно впливають на рівень механічних властивостей сталей [1-7]. Руйнування сталей часто може починатися від вихідних дефектів металургійного походження, якими є неметалеві включення, причому за дуже низьких номінальних напружень [1, 8-14]. Будь-який фактор, що сприяє зародженню та розвитку тріщин від неметалевих включень, становить велику небезпеку [1]. За даними роботи [15], 1 т звичайної вуглецевої сталі містить  $10^{12}$ - $10^{13}$  частинок оксидних включень і ще більше сульфідів, які мають різний рівень пластичності та міцності й часто негативно впливають на технологічну пластичність [10, 16-26].

В сталях присутні неметалеві включення оксидів, нітридів, сульфідів, силікатів тощо, які є однофазними [1, 15]. У той же час, в сталях виявляються гетерофазні включення, що мають різні фазовий склад і структуру, частка яких може досягати 30 % від загальної забрудненості [1, 27-30]. Необхідні дослідження таких включень з метою визначення основних типів структур, а також поведінки включень різних типів за різних деформаційно-теплових впливів. Існують кілька типів гетерофазних включень в сталях [1, 27]. Гетерофазні включення першого типу «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» складаються з легкоплавкої фази-оболонки  $\phi$ -01, усередині якої знаходиться тугоплавка фаза включення –  $\phi$ 2. Фаза-підкладка  $\phi$ 2 являє собою оксиди, шпінелі, нітриди чи карбонітриди. Фаза-оболонка  $\phi$ -01 найчастіше буває сульфідною або силікатною. Гетерофазні включення другого типу – це включення «фази поруч»  $\phi$ 1 та  $\phi$ 2. У цьому випадку не обов'язкова наявність великої різниці у температурах плавлення фаз. Найчастіше зустрічаються поєднання однотипних простих включень

оксидів, нітридів тощо. Гетерофазні включення третього типу «евтектики», четвертого типу «дисперсні фази в неметалевій матриці» та п'ятого типу «евтектика включення-матриця» будуть розглянуті у частині 2 даної статті. Отже, гетерофазні неметалеві включення є мікрокомпонентними формуваннями різних типів. Різноманітність гетерофазних включень вимагає дослідження основних типів їх структур, а також поведінки за різних деформаційно-теплових впливів, зокрема під час обробки сталей тиском, оскільки неметалеві включення часто визначають рівень їх технологічної пластичності, а також утворення різноманітних дефектів [27, 31].

**Мета роботи** – вивчення особливостей трансформації гетерофазних включень різних типів за гарячої та холодної прокатки сталей. Частина 1 присвячена вивченню трансформації гетерофазних включень першого та другого типу – «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» та «фази поруч».

**Методика дослідження.** Досліджували неметалеві включення в литих та прокатаних сталях 08кп, 08, 08Х, НБ-57, 08ГСЮТФ, ШХ15 металографічним (Neophot-31), петрографічним методом, а також шляхом мікрорентгеноспектрального аналізу (рентгенівський мікроаналізатор МС-46 «Сатеса», енергодисперсійний Energy 300 та хвильовий Wave 500 рентгенівські спектрометри) [1, 9, 21, 27]. Вивчали поведінку включень під час розтягування зразків (пристрій ІМАШ-5С) та прокатки сталей 08кп, 08Ю, 08Т, 45, R7 за температур 25-1100 °С у промислових умовах [1].

**Результати дослідження та їх обговорення.** Гетерофазні включення «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» складаються з легкоплавкої фази-оболонки  $\phi-01$ , усередині якої знаходиться тугоплавка фаза-включення –  $\phi2$  (рис. 1). Фаза-підкладка  $\phi2$  являє собою оксиди, шпінелі, нітриди, карбінітриди, що мають кубічну, неправильну, дендритну, голчасту форму. Фаза-оболонка (матриця)  $\phi-01$  – це сульфідні та силікати простого і складного складу, зокрема силікатне скло. Гетерофазні включення другого типу, де фази як би існують поруч – це включення «фази поруч»  $\phi1$  і  $\phi2$  (рис. 2). Другий тип гетерофазних включень загалом також пов'язаний з появою однієї з фаз першою, наприклад,  $\phi1$ , яка слугує підкладкою для кристалізації другої фази  $\phi2$ , проте тут фаза  $\phi2$  не є оболонкою або матрицею, а існує поряд із фазою  $\phi1$ . У цьому випадку не обов'язкова наявність великої різниці у температурах плавлення фаз, вони можуть бути цілком співставними. Часто зустрічаються такі варіанти, як, наприклад,  $Al_2O_3 + MnO \cdot Al_2O_3$ ,  $TiN + TiCN$ ,  $TiCN + FeO \cdot TiO_2$ ,  $FeO \cdot Al_2O_3 + MnO \cdot Al_2O_3$ ,  $MgS + MnS$  та інші.

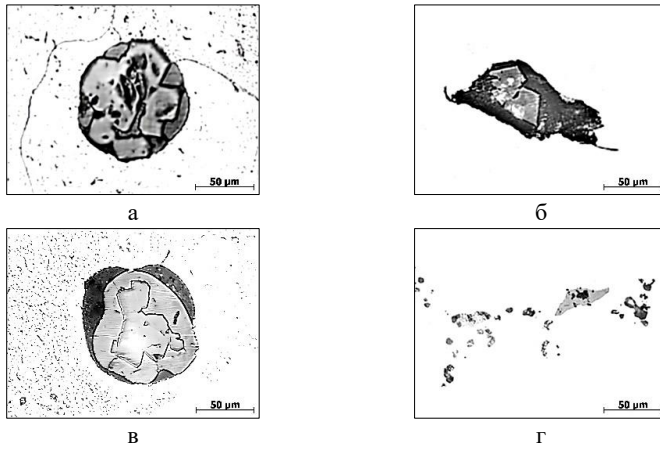


Рисунок 1 – Гетерофазні включення «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» в литих сталях

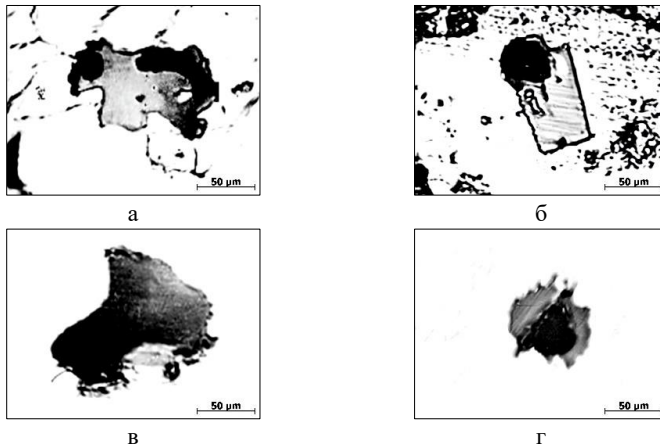


Рисунок 2 – Гетерофазні включення «фазы поруч» в литых сталях

На рис. 3 показані приклади ідентифікації включень складного складу в литому (а), гаряче- (б, в, г) та холоднокатаному стані (г). Зниження технологічної пластичності сталей, що пов'язане з присутністю гетерофазних включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» та «фазы поруч», може спостерігатися за високих і низьких температур деформації зі збільшенням вмісту цих включень.

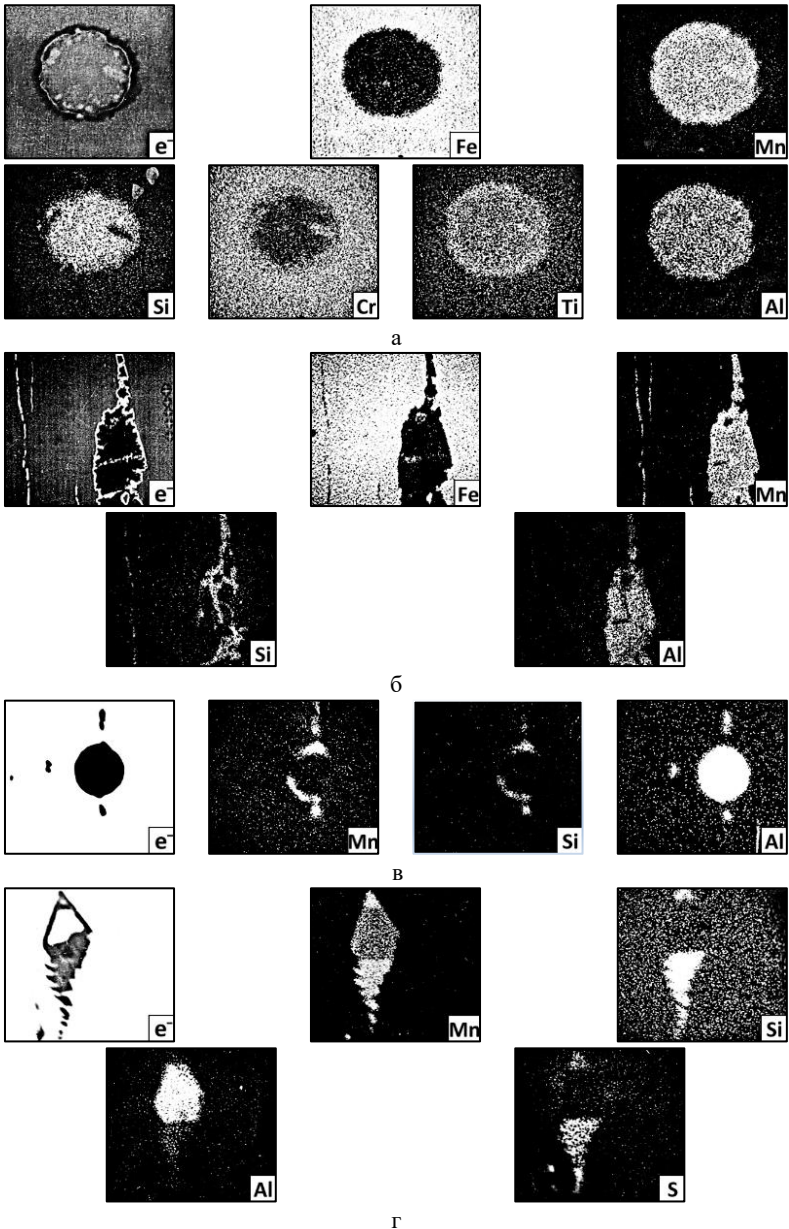
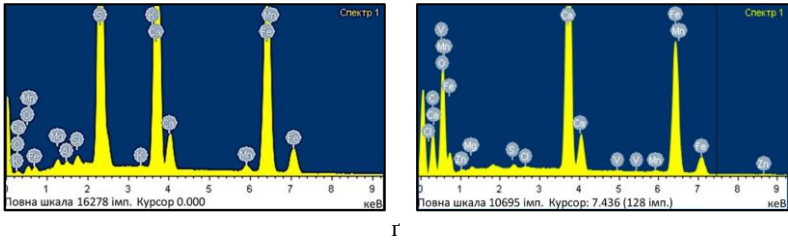


Рисунок 3 – Приклади ідентифікації гетерофазних включень в сталях



Г

Продовження рисунку 3

Вплив таких включень на технологічну пластичність залежить від їх поведінки під час деформування, розмірів та розподілу. За усіх температур шкідливий вплив мають грубі включення та їх скупчення, які викликають високу концентрацію напружень, ускладнюють пластичну течію сталі та сприяють утворенню тріщин, розшарувань та інших дефектів (рис. 4).

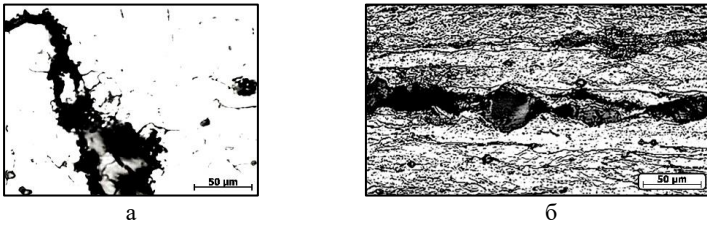


Рисунок 4 – Дефекти у гаряче- та холоднореформованому прокаті поблизу гетерофазних включень

Поведінка гетерофазних включень під час обробки сталі тиском, зокрема їх деформівність, визначається багатьма факторами, такими як температура їх плавлення або розм'якшення фаз включень, спосіб деформування сталі, температура та ступінь деформації, співвідношення фізико-механічних властивостей фаз включень і сталеві матриці, яке також визначається температурою, тощо [1, 27, 31]. Очевидно, що схильність до пластичної формозміни окремих фаз гетерофазних включень така сама, як і в однофазних включень відповідного типу та складу. У той самий час спільне деформування фаз, які складають одне включення і відокремлені внутрішніми межфазними границями, та сталеві матриці має вносити певні особливості у поведінку гетерофазних включень під час обробки сталей тиском.

Більшість фаз гетерофазних включень (оксиди, бориди, гідриди, нітриди) є тугоплавкими, для яких характерною властивістю є крихкість як у низькотемпературній, так і у високотемпературній області. Вона забезпечується спрямованістю зв'язків фаз проникнення у кристалічних

решітках включень та високим значенням сил Пайрлса-Набарро для дислокацій у цих решітках [1]. Більшість таких включень за температур гарячої обробки тиском не виявляють помітної пластичності та руйнуються крихко, оскільки для них температура холодноламкості знаходиться вище за температуру гарячого деформування сталі [1, 19]. Сульфідні фази мають нижчі температури плавлення, ніж тугоплавкі фази включень, але вищу пластичність [1, 19]. Пластична поведінка гетерофазних включень під час обробки тиском, наприклад, за гарячої або холодної прокатки залежить від рівня пластичності складових фаз та умов деформування. Утрудненість розвитку пластичної деформації в тугоплавких фазах включень обумовлена кількома причинами: розташуванням атомів неметалу в проміжках між шарами атомів металу, що перешкоджає легкому ковзанню; схильністю атомів неметалу розташовуватися на дислокаціях та границях зерен і субзерен; відхиленнями від стехіометрії, що породжують різні спотворення у кристалічних решітках; можливістю утворення спрямованого характеру міжатомних зв'язків [1].

*Гаряча прокатка.* Гетерофазні включення «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою», які складаються з силікатної або сульфідної оболонки  $\phi$ -01 та оксиду, шпінелі, нітриду титану  $\phi$ 2, виявляють неоднорідну деформівність під час гарячої прокатки. Силікатна або сульфідна фаза добре деформується, витягуючись у напрямку деформації (рис. 5, а-г, е, є), а корунд або шпінель не деформуються, але і не руйнуються, як спостерігалось у разі однофазних включень. Пластична силікатна або сульфідна оболонка  $\phi$ -01 приймає на себе напруження, що діють з боку сталєвої матриці, які витрачаються на її пластичну формозміну, і це сприяє пластичній релаксації цих напружень. Відповідно, зменшуються напруження, що діють на фазу включень  $\phi$ 2, яка не деформується, і ймовірність руйнування якої зменшується у порівнянні з аналогічними однофазними включеннями оксидів, шпінелей, нітриду титану та ін. [1, 9]. Укладання недеформованих включень оксидів, шпінелей, нітриду титану тощо у пластичну силікатну або сульфідну оболонку слід розглядати як спосіб зниження крихкості неметалевих включень за гарячої прокатки [1, 9].

Можливе руйнування силікатної фази-оболонки на останніх стадіях прокатки (рис. 5в). Іноді включення руйнувалися уздовж границь розділу фаз. Під впливом сил тертя з боку сталєвої матриці завдяки різній поведінці фаз включення відбувається поділ уздовж поверхні розділу – фази роз'єднуються та існують самостійно. Це призводить до зміни типу включень у процесі деформування: замість складних гетерофазних включень першого типу в сталі з'являються два різних за

складом, структурою і властивостями виду однофазних включень. За наявності в гетерофазному включенні «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» легкоплавких фаз – сульфідної та силікатної, що мають різний рівень пластичності, відбувається їх спільна деформація (рис. 5, д).

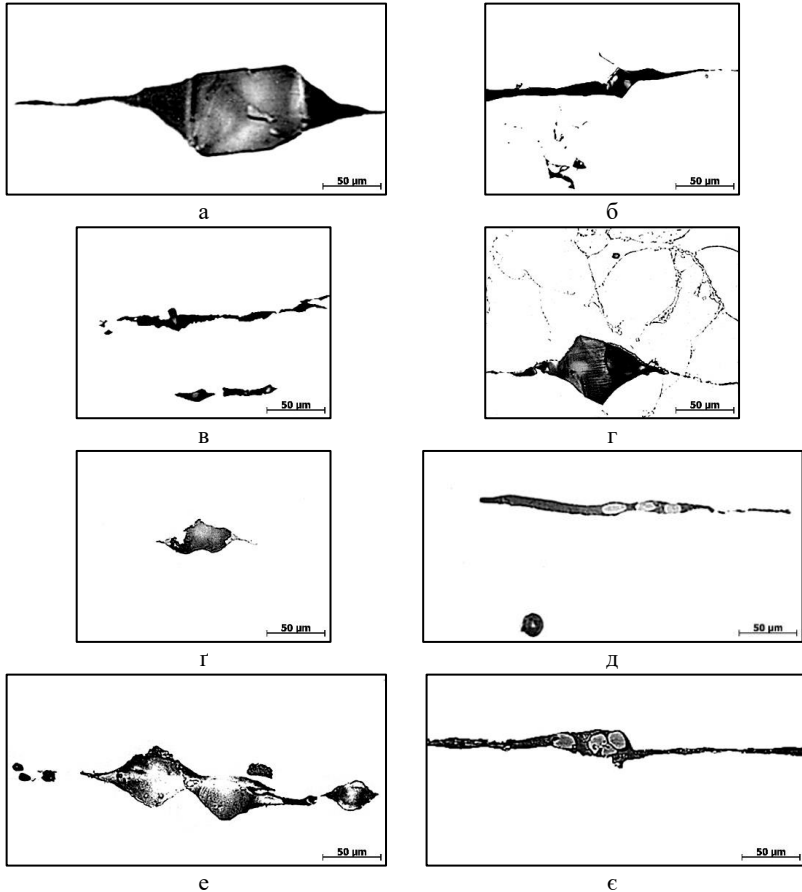


Рисунок 5 – Гетерофазні включення «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» після гарячої прокатки: а-г, е, є –  $MnO \cdot SiO_2 + Al_2O_3$ ,  $MgO \cdot SiO_2 + Al_2O_3$ ; г –  $(Fe, Mn)S + MnO \cdot SiO_2 + Al_2O_3$ ; д –  $(Fe, Mn)S + MnO \cdot SiO_2$

В процесі формозміни гетерофазних включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» між фазою-оболонкою включення  $\phi$ - $01$  і сталеву матрицею розвивається контактне тертя, яке зумовлене взаємодією їх поверхонь і перешкоджає їх відносному переміщенню [1].

Сили тертя стримують течію сталеві матриці навколо включення першого типу і розподілені на границі їх розділу нерівномірно, що пов'язано з нерівномірним розподілом нормальних напружень, які діють на включення. Слід зазначити, що наявність внутрішньої міжфазної границі  $\phi\text{-}01 \leftrightarrow \phi 2$  у включенні передбачає взаємодію між поверхнями фаз включення та виникнення на цих границях контактного тертя, що сприяє стримуванню пластичної течії фаз включення  $\phi\text{-}01$  і  $\phi 2$  (якщо одна з них або обидві є пластичними). Сили тертя на границі  $\phi\text{-}01 \leftrightarrow \phi 2$  визначаються температурою та ступенем деформації, а також рівнем пластичності фаз включення першого типу [1].

Максимальна величина дотичного напруження на міжфазній границі  $\phi\text{-}01 \leftrightarrow \phi 2$  за умовою пластичності обмежується величиною границь текучості фаз включення  $\phi\text{-}01$  і  $\phi 2$ , тому контактне тертя може збуджувати на міжфазній границі дотичне напруження, величина якого обмежена. Очевидно, що під час розгляду особливостей розвитку пластичної деформації системи фаз у гетерофазному включенні першого типу слід враховувати не лише взаємодію поверхонь фази-оболонки  $\phi\text{-}01$  включення та сталеві матриці, але також і взаємодію поверхонь фаз  $\phi\text{-}01$  та  $\phi 2$  в умовах контактного тертя, яке призводить до згладжування шорсткостей на границях  $\phi\text{-}01 \leftrightarrow \phi 2$ , що сприяє здатності прироблятися аналізованих пар тертя  $\phi\text{-}01\text{-}\phi 2$  і  $\phi\text{-}01\text{-}$ сталеві матриці. Вочевидь, для пластичних фаз включень першого типу цей процес виражений сильніше, ніж у випадках недеформівних однофазних включень. Крім того, взаємодія фаз  $\phi\text{-}01$  і  $\phi 2$  у процесі гарячої прокатки супроводжується проковзуванням уздовж міжфазних границь  $\phi\text{-}01 \leftrightarrow \phi 2$  завдяки наявності пластичної фази-оболонки [1], що сприяє релаксації напружень у включеннях «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою».

Для включень «фази поруч» обидві фази  $\phi 1$  і  $\phi 2$  контактують зі сталеві матрицею і утворюють з нею міжфазну границю включення – матриця, яка складається з двох ділянок:  $\phi 1 \leftrightarrow m$  та  $\phi 2 \leftrightarrow m$ . Пластична поведінка таких включень залежить від рівня пластичності кожної фази включення  $\phi 1$  і  $\phi 2$ , а також від температури деформування. Поблизу фаз включень  $\phi 1$  і  $\phi 2$  в сталевій матриці під час гарячої прокатки концентруються напруження різного рівня, крім того, виникають напруження міжфазної границі  $\phi 1 \leftrightarrow \phi 2$  у включенні [1].

Гетерофазні включення, що складаються із фаз з різним рівнем пластичності, виявляють неоднорідну деформівність під час гарячого деформування. Включення, що складаються з фаз недеформівних оксидів, шпінелей, нітридів і оксидів титану пластично не деформуються (рис. 6, а, г). Якщо одна з фаз слабо пластична, наприклад, фаза  $\text{FeO}\cdot\text{TiO}_2$  у включенні  $\text{TiCN} + \text{FeO}\cdot\text{TiO}_2$ , або

пластична, як  $(\text{Fe},\text{Mn})\text{S}$  у включенні  $\text{TiCN} + (\text{Fe},\text{Mn})\text{S}$ , вона витягується у напрямку течії сталі (рис. бд). Під час деформування двох силікатних чи сульфідних фаз  $\phi 1$  і  $\phi 2$  вони подовжуються у бік течії сталевій матриці (рис. б, в, г).

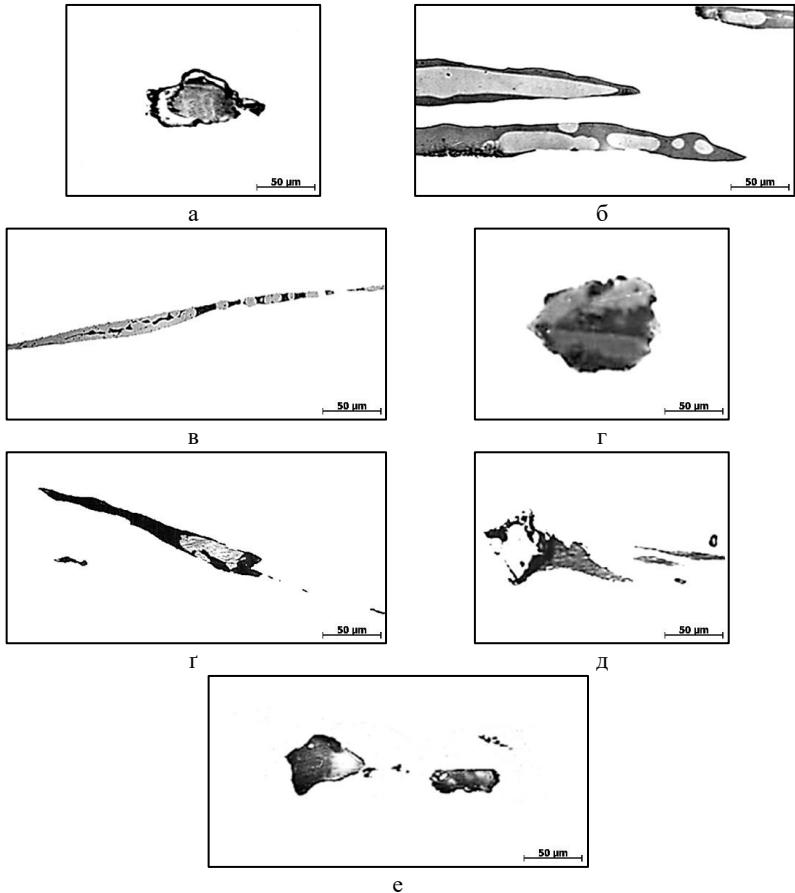


Рисунок 6 – Гетерофазні включення «фази поруч» після гарячої прокатки: а, г –  $\text{TiN} + \text{TiCN}$ ; б –  $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ; в, г –  $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2 + (\text{Fe},\text{Mn})\text{S}$ ; д –  $\text{TiCN} + (\text{Fe},\text{Mn})\text{S}$ ; е –  $\text{TiO} + \text{TiO}_2$

Водночас пластичність фаз  $\phi 1$  і  $\phi 2$ , які деформуються, зазвичай різна, що обумовлено відмінністю їх хімічного складу і кристалічної будови. Іноді включення руйнувалися по границі розділу фаз, що частіше спостерігали у випадках недеформованих фаз  $\phi 1$  і  $\phi 2$  (рис. б, е), коли під дією сил тертя з боку матриці відбувається поділ уздовж

поверхні їх розділу (внутрішньої міжфазної границі) – фази роз'єднуються та існують самостійно.

У процесі трансформації гетерофазних включень між фазами включення  $\phi 1$  і  $\phi 2$  та сталеву матрицю розвивається контактне тертя, що перешкоджає їх відносному переміщенню. Його характер на ділянках границі включення – матриця  $\phi 1 \leftrightarrow m$  і  $\phi 2 \leftrightarrow m$  є різним, що створює додаткову неоднорідність у розподілі сил тертя уздовж усієї міжфазної границі зі сталеву матрицею. Крім того, у потрійних стиках ділянок міжфазних границь зі сталеву матрицею  $\phi 1 \leftrightarrow m$ ,  $\phi 2 \leftrightarrow m$  та міжфазної границі у включенні  $\phi 1 \leftrightarrow \phi 2$  повинні виникати концентрації контактних напружень, що може викликати утворення мікротріщин у сталевій матриці поблизу включень і уздовж зазначених міжфазних границь. Сили тертя стримують течію сталеву матриці навколо включення та розподілені на різних ділянках міжфазної границі включення – матриця  $\phi 1 \leftrightarrow m$  і  $\phi 2 \leftrightarrow m$  нерівномірно, що пов'язано з нерівномірним розподілом нормальних напружень, які діють на гетерофазне включення другого типу [1]. Наявність внутрішньої міжфазної границі  $\phi 1 \leftrightarrow \phi 2$  у включенні передбачає взаємодію між поверхнями фаз включення і виникнення на цих границях контактного тертя, що сприяє стримуванню пластичного течії фаз включення  $\phi 1$  і  $\phi 2$  (якщо одна з них або обидві є пластичними). Максимальна величина дотичного напруження на міжфазній границі  $\phi 1 \leftrightarrow \phi 2$  за умовою пластичності обмежується величиною границь текучості фаз  $\phi 1$  і  $\phi 2$ , тому контактне тертя може порушити на міжфазній границі  $\phi 1 \leftrightarrow \phi 2$  дотичне напруження, величина якого обмежена. Крім того, взаємодія фаз  $\phi 1$  і  $\phi 2$  у процесі гарячої прокатки супроводжується проковзуванням уздовж міжфазних границь  $\phi 1 \leftrightarrow \phi 2$ , якщо одна з фаз включення або обидві фази є пластичними [1], що сприяє релаксації напружень у включеннях «фази поруч».

Екзогенні неметалеві включення. До них відносять грубі шлакові включення та частинки вогнетривких матеріалів. Гетерофазні шлакові включення виявляють неоднорідну деформівність залежно від природи фаз (рис. 7, а, б). Ці включення є частинками оксидів або шпінелей, укладені в силікатну або алюмосилікатну матрицю. Остання пластично деформується спільно з сталеву матрицею сталі, а частинки оксидів та шпінелей не деформуються, повертаються у силікатній матриці у напрямку її течії. Частинки зруйнованих вогнетривків, що потрапили в сталь під час виплавляння, у процесі гарячої прокатки крихко руйнуються (рис. 7, в).

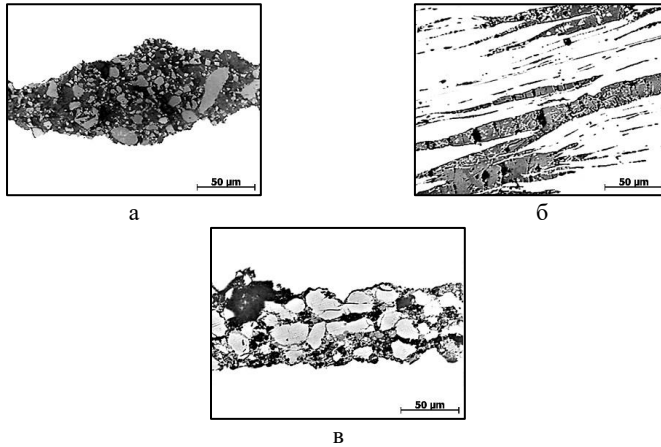


Рисунок 7 – Екзогенні включення в гарячедеформованих сталях

Холодна прокатка. Під час холодного деформування сталі, яке зазвичай відбувається після гарячої прокатки, формозміна гетерофазних включень триває у нових умовах, пов'язаних зі зміною температури та деформуючих зусиль. Водночас змінюються фізико-механічні властивості фаз гетерофазних включень та сталеві матриці [1, 9]. Поведінка фаз гетерофазних включень під час холодного деформування пов'язана з рівнем їх пластичності, який досліджений на прикладах однофазних включень [1, 9]. У той же час особливості структури гетерофазних включень і наявність міжфазних внутрішніх границь повинні вносити певні особливості у процесі їх формозміни.

У випадках включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою», які складаються з силікатної оболонки  $\phi-01$ , що пластично продеформувалася у процесі попередньої гарячої деформації, а також недеформівного оксиду, шпінелі чи нітриду титану  $\phi2$ , обидві фази не пластичні під час холодної прокатки, крихко руйнуються і перерозподіляються у смуги, що розташовані у напрямку течії сталеві матриці (рис. 8а-в). Відбувалося руйнування також уздовж межфазних границь  $\phi-01 \leftrightarrow \phi2$ . Включення, що є частинками недеформованої фази  $\phi2$  (оксиду, нітриду), укладеної в пластичну сульфідну матрицю  $\phi-01$ , виявляють неоднорідну деформівність (рис. 8, г). Зустрічаються гетерофазні включення сульфід-оксид з різною деформівністю сульфідної фази, яка залежить від її хімічного складу [1, 9]. Під впливом сил контактного тертя завдяки різній поведінці фаз включення відбувається поділ уздовж поверхні їх розділу – фази роз'єднуються та існують самостійно. Поворот уламків фаз включення свідчить про їх незалежне переміщення в сталевій матриці. За наявності сульфідної  $\phi-$

$\phi 1$  і силікатної  $\phi 2$  фаз, що мають різний рівень пластичності, відбувається деформування сульфідної фази, силікатна фаза при цьому крихко руйнується (рис. 8, г). За наявності оксидної чи нітридної фази  $\phi 2$  в оксидній оболонці  $\phi-01$  обидві фази включення під час холодної прокатки не деформуються (рис. 8, д). Як і за гарячого деформування, у процесі формозміни гетерофазних включень першого типу між фазаю-оболонкою включення  $\phi-01$  і сталеву матрицею розвивається контактне тертя, що обумовлене взаємодією їх поверхонь, яке перешкоджає їх відносному переміщенню [1].

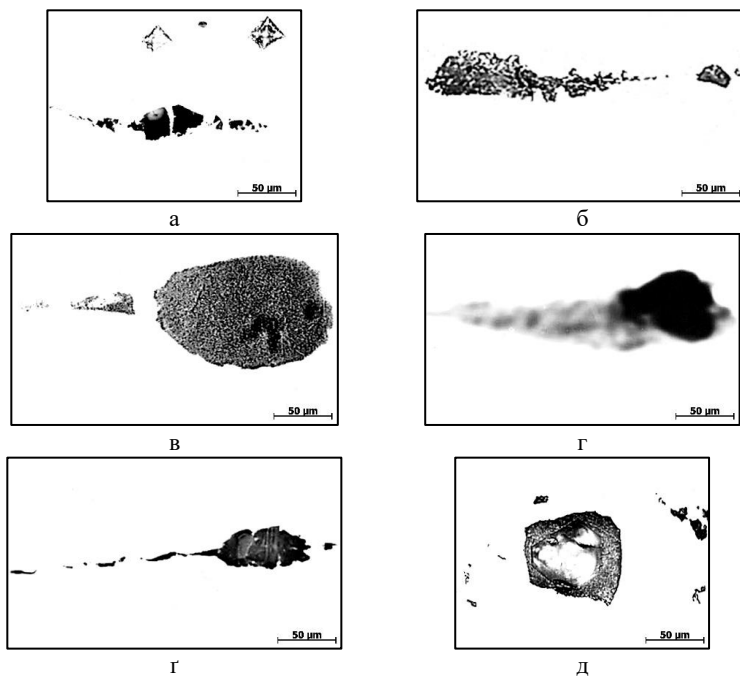


Рисунок 8 – Гетерофазні включення «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» після холодної прокатки: а-в –  $MnO \cdot SiO_2 + Al_2O_3$ ,  $MgO \cdot SiO_2 + Al_2O_3$ ; г –  $(Fe, Mn)S + Al_2O_3$ ; д –  $(Fe, Mn)S + MnO \cdot SiO_2$ ; е –  $MnO \cdot Al_2O_3 + Al_2O_3$

Включення «фази поруч», що складаються з фаз  $\phi 1$  і  $\phi 2$  – оксидів, шпінелей, нітридів та карбонітридів титану, під час холодної прокатки пластично не деформуються (рис. 9, а, б). У великих включеннях помітні тріщини, які призводять до їх руйнування. Крім того, відбувається руйнування включень уздовж міжфазних границь  $\phi 1 \leftrightarrow \phi 2$ . Силікатні фази  $\phi 1$  та  $\phi 2$  включень пластично не

деформуються (рис. 9, в) і крихко руйнуються. Під час деформування двох сульфідних фаз  $\phi 1$  і  $\phi 2$  вони подовжуються у напрямку течії сталеві матриці. Гетерофазні включення другого типу, що складаються з сульфідної та силікатної фаз  $\phi 1$  і  $\phi 2$  з різним рівнем пластичності, виявляють неоднорідну деформівність під час холодного деформування (рис. 9, г, ґ). Водночас пластична сульфідна фаза може стримувати руйнування крихкої силікатної фази.

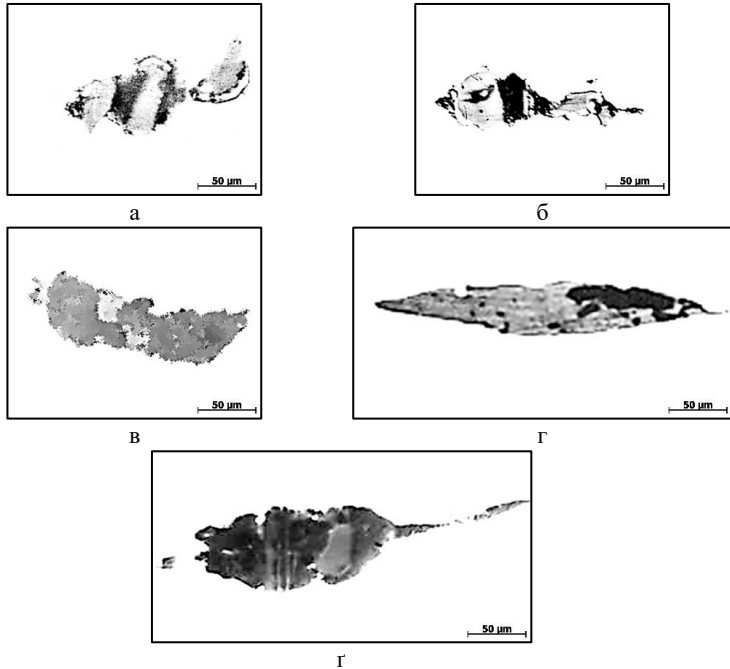


Рисунок 9 – Гетерофазні включення «фази поруч» після холодної прокатки: а –  $\text{TiN} + \text{TiCN}$ ; б –  $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ; в –  $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ; г, ґ –  $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2 + (\text{Fe}, \text{Mn})\text{S}$

Під час холодної прокатки в процесі трансформації включень між фазами включення  $\phi 1$  і  $\phi 2$  та сталеві матрицею розвивається контактне тертя, характер якого на ділянках границі включення – матриця  $\phi 1 \leftrightarrow m$  і  $\phi 2 \leftrightarrow m$  є різним, що створює додаткову неоднорідність у розподілі сил тертя уздовж міжфазної границі зі сталеві матрицею. Максимальна величина дотичного напруження на міжфазній границі  $\phi 1 \leftrightarrow \phi 2$  за умовою пластичності обмежується величиною границі текучості фаз включення  $\phi 1$  і  $\phi 2$  [1].

За наявності пластичних фаз у включеннях «тугоплавка фаза, що

оточена легкоплавкою оболонкою» та «фази поруч» визначали вплив температури деформації розтягуванням (пристрій ІМАШ-5С) на помітну пластичність, коли відбувається множинне ковзання (табл. 1, 2). Чим вищою була температура, тим вищим був ступінь деформації  $\varepsilon$ , за якого починалося множинне ковзання в пластичних фазах включень. Слід зазначити, що для досліджених типів гетерофазних включень величина  $\varepsilon$  дещо менша, ніж у однофазних включень відповідного хімічного складу, що пов'язано з впливом другої фази, яка гальмує деформаційні процеси у пластичній фазі включень [1, 9].

Таблиця 1 – Ступінь деформації ( $\varepsilon$ , %), за якого починалося множинне ковзання у включеннях «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою»

Включення $\phi$ -01 + $\phi$ 2, сталь	Температура деформування, °С				
	25	600	900	1000	1100
(Mn,Fe)S + MnO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 08Ю	6	10	16	22	29
MnO·SiO <sub>2</sub> + MnO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 08Ю	–	4	9	16	20
FeO·TiO <sub>2</sub> + TiCN, 08Т	–	–	–	4	8

Таблиця 2 – Ступінь деформації ( $\varepsilon$ , %), за якого починалося множинне ковзання у включеннях «фази поруч» (чисельник – для фази  $\phi$ 1, знаменник – для фази  $\phi$ 2)

Включення $\phi$ 1 + $\phi$ 2, сталь	Температура деформування, °С				
	25	600	900	1000	1100
(Mn,Fe)S + FeS, 08кп	8 / 11	11 / 14	19 / 22	25 / 29	27 / 32
MnO·SiO <sub>2</sub> + FeO·SiO <sub>2</sub> , 08кп	– / –	6 / 11	11 / 14	18 / 22	21 / 25
MnO·SiO <sub>2</sub> + (Mn,Fe)S, 08кп	– / 7	8 / 13	12 / 18	20 / 25	23 / 28
(Mn,Fe)S + MnO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 08Ю	7 / –	9 / –	15 / –	20 / –	23 / –
FeO·TiO <sub>2</sub> + TiCN, 08Т	– / –	– / –	– / –	5 / –	8 / –

У процесі навантаження гетерофазного матеріалу (сталі з гетерофазними включеннями) відбувається різко неоднорідний розподіл напружень та деформацій [1, 9, 32]. Слід зазначити, що в самих гетерофазних включеннях «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» і «фази поруч», порівняно з однофазними частинками, неоднорідність напружень та деформацій посилюється у зв'язку з наявністю фаз, що мають різний рівень пластичності, а також внутрішніх міжфазних границь [1, 9, 32]. Вочевидь, це призводить до утворення на міжфазних границях джерел деформаційних дефектів, що випускаються у сусідні фази включень. Мікропластичні зсуви в пластичних фазах таких включень здатні частково перерозподіляти поле концентратора напружень, яким є гетерофазне включення «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» або «фази поруч».

Під час розгляду пластичної поведінки гетерофазних включень

«тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» і «фази поруч» в пластичній сталевій матриці важливе значення мають міжфазні границі включення – матриця, а також внутрішні міжфазні границі у включеннях [33, 34]. Неоднорідний розвиток зсувів поблизу внутрішніх міжфазних границь сприяє прояву поворотних мод деформації у включеннях, що викликають як розвиток проковзування, так і кластерний механізм масопереносу уздовж внутрішніх границь гетерофазних включень [1, 34]. Вочевидь, поблизу зазначених границь під час навантаження виникають дальнодіючі моментні та асиметричні напруження [1, 34]. За пластичної деформації взаємодія гетерофазних включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» та «фази поруч» і сталевій матриці, що визначає їх спільну пластичну формозміну, пов'язана з розвитком конкуруючих процесів на міжфазних границях включення – матриця, як це спостерігається у випадках однофазних включень [35], та на міжфазних границях у включеннях: міжфазне тертя та проковзування (гаряче або холодне в залежності від температури деформування). Механізми кожного із зазначених процесів залежать від температурного режиму деформування, рівня пластичності включень та сталевій матриці, а також від будови границь включення – матриця та міжфазних границь у включеннях, що визначає можливості руху та взаємодії міжфазних дефектів [35]. Зазначені процеси визначають рівень пластичності границь включення – матриця та внутрішніх границь у включеннях і істотно впливають на характер формозміни гетерофазних включень, що розглядаються.

З точки зору мезомеханіки пластичної деформації, поряд з локалізацією пластичної течії в зонах стиснутої деформації у включеннях «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» і «фази поруч» за низьких температур (25-600 °С) проявляється ковзання уздовж границь включення – матриця, яке супроводжується виникненням у фазах включень періодичних акомодацийних зсувів (холодне проковзування) [1]. За високотемпературного деформування (900 °С і вище) відбувається проковзування (гаряче) уздовж границь включення – матриця та внутрішніх міжфазних границь у включеннях, яке пов'язане з рухом міжфазних дислокацій [1, 34, 35].

**Висновки.** Гетерофазні включення «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» і «фази поруч» є мікрокомпонентними формуваннями в сталях, поведінка яких за гарячої і холодної прокатки пов'язана зі складною взаємодією складових фаз включень, а також взаємодією у системі міжфазних границь включення – матриця та внутрішніх міжфазних границь у включеннях. Досліджені включення характеризуються своїми закономірностями розвитку деформаційних

процесів, які визначаються їх хімічним та фазовим складом, структурою, деформаційною здатністю фаз включень, температурою деформування. Встановлено взаємний вплив фаз включень на їх спільну деформацію під час гарячої і холодної прокатки сталей.

Формозміна включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» за гарячої прокатки визначається рівнем пластичності фази-оболонки, а також розвитком складної взаємодії фаз внаслідок розвитку міжфазного тертя та проковзування. Укладання недеформованих включень оксидів, шпінелей, нітриду титану тощо у пластичну силікатну або сульфідну оболонку слід розглядати як спосіб зниження крихкості неметалевих включень під час гарячої прокатки. Формозміна включень «фази поруч» за гарячої прокатки визначається рівнем пластичності фаз включення, а також розвитком складної взаємодії фаз внаслідок розвитку міжфазного тертя та проковзування (за наявності пластичної фази).

Формозміна включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» за холодної прокатки визначається рівнем пластичності сульфідної фази-оболонки, а також розвитком складної взаємодії фаз внаслідок розвитку міжфазного тертя та холодного проковзування уздовж міжфазних границь у включеннях. У разі наявності силікатної фази-оболонки зазначені гетерофазні включення під час холодної прокатки крихко руйнуються. Формозміна включень «фази поруч» за холодної прокатки визначається рівнем пластичності сульфідної фази включення (за її наявності), а також розвитком складної взаємодії фаз внаслідок розвитку міжфазного тертя та холодного проковзування.

Дослідження ролі пластичних фаз у включеннях «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» і «фази поруч» показало, що чим вищою є температура деформування, тим вищим стає ступінь деформації, за якого у цих фазах починалося множинне ковзання. Пластичні фази, а також міжфазні границі відіграють істотну роль у процесах формозміни гетерофазних включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» та «фази поруч» під час гарячої та холодної прокатки сталей.

Результати вивчення поведінки гетерофазних включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» і «фази поряд» в процесі гарячої та холодної прокатки можуть бути корисними під час вибору режимів обробки сталей тиском, метою якої може служити зміна властивостей включень, зокрема, їх пластичності, що представляє практичний інтерес у забезпеченні рівня технологічної пластичності та зниження ризику утворення різного роду дефектів за обробки сталей тиском.

**Перелік посилань**

1. Губенко С. И., Ошкадеров С. П. Неметаллические включения в стали. Киев : Наукова думка, 2016. 528 с.
2. Kusche C. F., Gibson J. S.-L., Wollenweber M. A., Korte-Kerzel S. On the mechanical properties and deformation mechanisms of manganese sulphide inclusions. *Mater. Des.* 2020. Vol. 193(2). 108801. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108801>
3. Vasconcellos da Costa e Silva A. L. The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications. *J. Mater. Res. Technol.* 2019. Vol. 8(2). P. 2408–2422. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.009>
4. Pindar S., Pande M. M. Formation of interfacial voids around silica inclusions in Si-deoxidized steels during cooling. *Metall. Mater. Trans. B.* 2025. Vol. 56. P. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s11663-024-03355-0>
5. Zhang L., Ren Y. Non-metallic inclusions in the interstitial free steel. *Handbook of Non-Metallic Inclusions in Steels.* 2025. P. 687–721. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-9638-0\\_27](https://doi.org/10.1007/978-981-97-9638-0_27)
6. Yoshida S. Physical meaning of physical-mesomechanical formulation of deformation and fracture. *AIP Conf. Proc.* 2010. Vol. 1301. P. 146–155. <https://doi.org/10.1063/1.3526608>
7. Liu Y., Fan Q., Liu Y., Ning Y., Zhang J., Yu H., Zhu Z. Microstructural analysis of non-metallic inclusions in atmosphere melted and poured stainless steel investment castings-international. *Int. J. Met.* 2025. Vol. 19. P. 2443–2457. <https://doi.org/10.1007/s40962-024-01467-6>
8. Qayyum F., Umar M., Elagin V., Kirschner M., Hoffmann F., Guk S., Prah U. Influence of non-metallic inclusions on local deformation and damage behavior of modified 16MnCrS5 steel. *Crystals.* 2022. Vol. 12(2). 281. <https://doi.org/10.3390/cryst12020281>
9. Бельченко Г. И., Губенко С. И. Неметаллические включения и качество стали. Киев : Техника, 1980. 168 с.
10. Yang W., Peng K., Zhang L., Ren Q. Deformation and fracture of non-metallic inclusions in steel at different temperatures. *J. Mater. Res. Technol.* 2020. Vol. 9(6). P. 15016–15022. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.066>
11. Wang J., Shen Y., Liu Y., Wang F., Jia N. Tailoring strength and ductility of a Cr-containing high carbon steel by cold-working and annealing. *Materials.* 2019. Vol. 12(24). 4136. <https://doi.org/10.3390/ma12244136>
12. Sága M., Blatnická M., Blatnický M., Dižo J., Gerlici J. Research of the fatigue life of welded joints of high strength steel S960 QL created using laser and electron beams. *Materials.* 2020. Vol. 13(11). 2539. <https://doi.org/10.3390/ma13112539>
13. Rudnic S. J. Deformation of binary non-metallic inclusions. *J. Iron Steel Res.* 1962. Vol. 29(5). P. 177–180.
14. Lipiński T. Analysis of the distribution of non-metallic inclusions and its impact on the fatigue strength parameters of carbon steel melted in an electric furnace. *Materials.* 2024. Vol. 17(24). 6151. <https://doi.org/10.3390/ma17246151>
15. Kiessling R., Lange N. Non-metallic inclusions in steel. Metals Society, 1978. 465 p.

16. Wang Y., Yang Y., Dong Z., Park J. H., Mi Z., Mao X., Mu W. Inclusion engineering in medium Mn steels: effect of hot-rolling process on the deformation behaviors of oxide and sulfide inclusions. *Metall. Mater. Trans. B.* 2022. Vol. 53. P. 2182–2197. <https://doi.org/10.1007/s11663-022-02517-2>
17. Pickering F. B. J., Met A. Some influence of mechanical working on the deformation of non-metallic inclusions. *J. Iron and Steel Inst.* 1958. Vol. 189(2). P. 148–159.
18. Wei H., Gao X., Ren Q., Zhang L. Evolution of oxide and sulfide inclusions during the production of an Al-killed free-cutting steel. *Metall. Res. Technol.* 2022. Vol. 119(6). 609. <https://doi.org/10.1051/metal/2022093>
19. Губенко С. І., Парусов Е. В., Парусов О. В. Формозміна і перерозподіл неметалевих включень в сталях за обробки тиском. *Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії.* 2023. Вип. 37. С. 407–433. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-407-433>
20. Gubenko S. I., Parusov E. V. Evolution of nonmetallic inclusions during hot rolling of steels. *Mater. Sci.* 2024. Vol. 60. P. 367–374. <https://doi.org/10.1007/s11003-025-00895-x>
21. Liu N., Cheng G., Zhang L.-F., Yang W., Ren Y., Wang G.-C., Liu X.-M. Composition evolution and deformation of different non-metallic inclusions in a bearing steel during hot rolling. *J. Iron Steel Res. Int.* 2022. Vol. 29. P. 552–562. <https://doi.org/10.1007/s42243-022-00761-z>
22. Malkiewicz T., Rudnic S. J. Deformation of non-metallic inclusions. *J. Iron and Steel Inst.* 1963. Vol. 201(1). P. 33–38.
23. Парусов Э. В., Нестеренко А. М., Луценко В. А., Сычков А. Б. Критериальная оценка влияния неметаллических включений на обрывность при волочении кордовой проволоки из стали 70. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* 2004. Вып. 7. С. 217–220.
24. Zhang L., Ren Y. Deformation of non-metallic inclusions in typical steels during rolling and processing. *Handbook of Non-Metallic Inclusions in Steels.* 2025. P. 665–685. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-9638-0\\_26](https://doi.org/10.1007/978-981-97-9638-0_26)
25. Yang Y., Zhan D., Qiu G., Li X., Jiang Z., Zhang H. Inclusion evolution in solid steel during rolling deformation: a review. *J. Mater. Res. Technol.* 2022. Vol. 18. P. 5103–5115. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.018>
26. Weitao L., Fapu W., Guangfu Y., Huajun W., Kaimin W., Xingyu J., Haiyan T. Characteristics and evolution of non-metallic inclusions in metallurgical production of GCr15 bearing steel. *Special Steel.* 2025. Vol. 46(1). P. 79–86. <https://doi.org/10.20057/j.1003-8620.2024-00196>
27. Губенко С. И. Гетерофазные микрокомпозиционные включения в сталях. Germany-Mauritius, Beau Bassin : Palmarius Academic Publishing, 2019. 330 с.
28. Ren Y., Yang W., Zhang L. Deformation of non-metallic inclusions in steel during rolling process: a review. *ISIJ Int.* 2022. Vol. 62(11). P. 2159–2171. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-235>
29. Wang J., Yang W., Mei X., Li D., Tian H., Xiao A., Xue Z. Characteristics and precipitation behavior of (Ti, V)(C, N<sub>1-x</sub>)-CrC<sub>3</sub>-MoS<sub>2</sub> complex inclusions in GCr15 steel for cylindrical rollers of shield machine main bearings. *J. Mater. Res. Technol.* 2025. Vol. 38. P. 2181–2190. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.065>
30. Bao D., Cheng G., Zhang J., Wang Z., Li W., Wang S. Composition

characteristics and control methods of  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} + (\text{Mn,Ca})\text{S}$  complex inclusions in D2 high-speed railway wheel steel. *Metall. Mater. Trans. B*. 2025. Vol. 56. P. 3428–3439. <https://doi.org/10.1007/s11663-025-03565-0>

31. Gubenko S. I. Plasticity origin of heterophase inclusions at steel forming. *Steel Transl.* 2020. Vol. 50(10). P. 730–739. <https://doi.org/10.3103/S0967091220100046>

32. Belchenko G. I., Gubenko S. I. Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling. *Metally*. 1983. No 4. P. 80–84.

33. Губенко С. Межфазные границы включение-матрица в сталях. Межфазные границы неметаллическое включение-матрица и свойства сталей. Germany-Mauritius, Beau Bassin : Palmarium Academic Publishing, 2017. 506 с.

34. Gubenko S. Role of inclusion–matrix steel interphase boundaries in the development of relaxation processes near nonmetallic inclusions. *Met. Sci. Heat Treat.* 2020. Vol. 62(5). P. 299–305.

35. Губенко С. І., Парусов Е. В. Про конкуруючі процеси на границях включення-матриця за прокатки сталей. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2023. № 2(101). С. 39–46. <https://doi.org/10.30838/j.pmhtml.2413.040723.39.982>

## References

1. Gubenko, S. I., & Oshkaderov, S. P. (2016). *Nemetallicheskie vklucheniia v stali* [Non-metallic inclusions in steel], Naukova Dumka.

2. Kusche, C. F., Gibson, J. S.-L., Wollenweber, M. A., & Korte-Kerzel, S. (2020). On the mechanical properties and deformation mechanisms of manganese sulphide inclusions. *Mater. Des.*, 193(2), 108801. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108801>

3. Vasconcellos da Costa e Silva, A. L. (2019). The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications. *J. Mater. Res. Technol.*, 8(2), 2408-2422. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.009>

4. Pindar, S., & Pande, M. M. (2025). Formation of interfacial voids around silica inclusions in Si-deoxidized steels during cooling. *Metall. Mater. Trans. B*, 56, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s11663-024-03355-0>

5. Zhang, L., & Ren, Y. (2025). Non-metallic inclusions in the interstitial free steel. *Handbook of Non-Metallic Inclusions in Steels*, 687-721. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-9638-0\\_27](https://doi.org/10.1007/978-981-97-9638-0_27)

6. Yoshida, S. (2010). Physical meaning of physical-mesomechanical formulation of deformation and fracture. *AIP Conf. Proc.*, 1301, 146-155. <https://doi.org/10.1063/1.3526608>

7. Liu, Y., Fan, Q., Liu, Y., Ning, Y., Zhang, J., Yu, H., & Zhu, Z. (2025). Microstructural analysis of non-metallic inclusions in atmosphere melted and poured stainless steel investment castings-international. *Int. J. Met.*, 19, 2443-2457. <https://doi.org/10.1007/s40962-024-01467-6>

8. Qayyum, F., Umar, M., Elagin, V., Kirschner, M., Hoffmann, F., Guk, S., & Prah, U. (2022). Influence of non-metallic inclusions on local deformation and damage behavior of modified 16MnCrS5 steel. *Crystals*, 12(2), 281. <https://doi.org/10.3390/cryst12020281>

9. Belchenko, G. I., & Gubenko, S. I. (1980). *Nemetallicheskie vklucheniia i*

*kachestvo stali* [Non-metallic inclusions and quality of steel]. Tekhnika. [In Russian].

10. Yang, W., Peng, K., Zhang, L., & Ren, Q. (2020). Deformation and fracture of non-metallic inclusions in steel at different temperatures. *J. Mater. Res. Technol.*, 9(6), 15016-15022. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.066>

11. Wang, J., Shen, Y., Liu, Y., Wang, F., & Jia, N. (2019). Tailoring strength and ductility of a Cr-containing high carbon steel by cold-working and annealing. *Materials*, 12(24), 4136. <https://doi.org/10.3390/ma12244136>

12. Sága, M., Blatnická, M., Blatnický, M., Dižo, J., & Gerlici, J. (2020). Research of the fatigue life of welded joints of high strength steel S960 QL created using laser and electron beams. *Materials*, 13(11), 2539. <https://doi.org/10.3390/ma13112539>

13. Rudnic, S. J. (1962). Deformation of binary non-metallic inclusions. *J. Iron Steel Res.*, 29(5), 177-180.

14. Lipiński, T. (2024). Analysis of the distribution of non-metallic inclusions and its impact on the fatigue strength parameters of carbon steel melted in an electric furnace. *Materials*, 17(24), 6151. <https://doi.org/10.3390/ma17246151>

15. Kiessling, R., & Lange, N. (1978). *Non-metallic inclusions in steel*. Metals Society.

16. Wang, Y., Yang, Y., Dong, Z., Park, J. H., Mi, Z., Mao, X., & Mu, W. (2022). Inclusion engineering in medium Mn steels: effect of hot-rolling process on the deformation behaviors of oxide and sulfide inclusions. *Metall. Mater. Trans. B*, 53, 2182-2197. <https://doi.org/10.1007/s11663-022-02517-2>

17. Pickering, F. B. J., & Met, A. (1958). Some influence of mechanical working on the deformation of non-metallic inclusions. *J. Iron and Steel Inst.*, 189(2), 148-159.

18. Wie, H., Gao, X., Ren, Q., & Zhang, L. (2022). Evolution of oxide and sulfide inclusions during the production of an Al-killed free-cutting steel. *Metall. Res. Technol.*, 119(6), 609. <https://doi.org/10.1051/metal/2022093>

19. Gubenko, S. I., Parusov, E. V., & Parusov, O. V. (2023). Formozmina i pererозpodil nemetalevykh vklіuchen v staliakh za obrobky tyskom [Shape change and partitioning of non-metallic inclusions in steels during pressure treatment]. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, 37, 407-433. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-407-433>

20. Gubenko, S. I., & Parusov, E. V. (2024). Evolution of nonmetallic inclusions during hot rolling of steels. *Mater. Sci.*, 60, 367-374. <https://doi.org/10.1007/s11003-025-00895-x>

21. Liu, N., Cheng, G., Zhang, L.-F., Yang, W., Ren, Y., Wang, G.-C., & Liu, X.-M. (2022). Composition evolution and deformation of different non-metallic inclusions in a bearing steel during hot rolling. *J. Iron Steel Res. Int.*, 29, 552-562. <https://doi.org/10.1007/s42243-022-00761-z>

22. Malkiewicz, T., & Rudnic, S. J. (1963). Deformation of non-metallic inclusions. *J. Iron and Steel Inst.*, 201(1), 33-38.

23. Parusov, E. V., Nesterenko, A. M., Lutsenko, V. A., & Sychkov, A. B. (2004). Kriterialnaia otsenka vliianiia nemetallicheskih vklіuchenii na obryvnost pri voločeniі kordovoi provoloki iz stali 70. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, 7, 217-220.

24. Zhang, L., & Ren, Y. (2025). Deformation of non-metallic inclusions in typical steels during rolling and processing. *Handbook of Non-Metallic Inclusions in Steels*, 665-685. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-9638-0\\_26](https://doi.org/10.1007/978-981-97-9638-0_26)

25. Yang, Y., Zhan, D., Qiu, G., Li, X., Jiang, Z., & Zhang, H. (2022). Inclusion evolution in solid steel during rolling deformation: a review. *J. Mater. Res. Technol.*, 18, 5103-5115. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.018>
26. Weitao, L., Fapu, W., Guangfu, Y., Huajun, W., Kaimin, W., Xingyu, J., & Haiyan, T. (2025). Characteristics and evolution of non-metallic inclusions in metallurgical production of GCr15 bearing steel. *Special Steel*, 46(1), 79-86. <https://doi.org/10.20057/j.1003-8620.2024-00196>
27. Gubenko, S. I. (2019). *Heterofaznye mikrokompozitnye vklucheniia v staliakh* [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Palmarium Academic Publishing.
28. Ren, Y., Yang, W., & Zhang, L. (2022). Deformation of non-metallic inclusions in steel during rolling process: a review. *ISIJ Int.*, 62(11), 2159-2171. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-235>
29. Wang, J., Yang, W., Mei, X., Li, D., Tian, H., Xiao, A., & Xue, Z. (2025). Characteristics and precipitation behavior of (Ti,V)(C<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub>)-CrC<sub>3</sub>-MoS<sub>2</sub> complex inclusions in GCr15 steel for cylindrical rollers of shield machine main bearings. *J. Mater. Res. Technol.*, 38, 2181-2190. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.065>
30. Bao, D., Cheng, G., Zhang, J., Wang, Z., Li, W., & Wang, S. (2025). Composition characteristics and control methods of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - CaO + (Mn,Ca)S complex inclusions in D2 high-speed railway wheel steel. *Metall. Mater. Trans. B*, 56, 3428-3439. <https://doi.org/10.1007/s11663-025-03565-0>
31. Gubenko, S. I. (2020). Plasticity origin of heterophase inclusions at steel forming. *Steel Transl.*, 50(10), 730-739. <https://doi.org/10.3103/S0967091220100046>
32. Belchenko, G. I., & Gubenko, S. I. (1983). Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling. *Metally*, 4, 80-84.
33. Gubenko, S. (2017). *Mezhfaznye hranitsy vkluchenie-matritsa v staliakh. Mezhfaznye hranitsy nemetallichesкое vkluchenie-matritsa i svoystva stalei* [Inclusion-matrix interphase boundaries in steels. Nonmetallic inclusion-matrix interphase boundaries and steel properties]. Palmarium Academic Publishing.
34. Gubenko, S. (2020). Role of inclusion-matrix steel interphase boundaries in the development of relaxation processes near nonmetallic inclusions. *Met. Sci. Heat Treat.*, 62(5), 299-305.
35. Gubenko, S. I., & Parusov, E. V. (2023). On competing processes at inclusion-matrix boundaries during steel rolling. *Metal Science and Heat Treatment of Metals*, 2(101), 39-46. <https://doi.org/10.30838/j.pmhtm.2413.040723.39.982>

**S. I. Gubenko**<sup>1,2</sup>, D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0001-6626-3979

**E. V. Parusov**<sup>1</sup>, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-4560-2043

**I. M. Chuiko**<sup>1,\*</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-4753-614X

**O. V. Parusov**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-9879-6179

<sup>1</sup> *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine*

<sup>2</sup> *Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture"*

\* *Corresponding author: ferrosplav@ukr.net*

## FEATURES OF THE TRANSFORMATION OF HETEROPHASE NON-METALLIC INCLUSIONS DURING HOT AND COLD ROLLING OF STEELS. PART 1

**Abstract.** The behavior of microcomposite heterophase inclusions of the types “refractory phase encased in a fusible shell” and “phases are beside” during hot and cold rolling of steels has been investigated. It is demonstrated that their deformation behavior is governed by the complex interaction of the constituent phases within the inclusions, as well as by the interactions across the inclusion–matrix interfaces and the internal interphase boundaries inside the inclusions. The study establishes that these inclusions exhibit characteristic patterns of deformation processes determined by their chemical and phase composition, structure, deformability of the inclusion phases, and deformation temperature. The mutual influence of the phases on their joint deformation under hot and cold rolling conditions has been identified. It is shown that the morphological evolution of inclusions of the “refractory phase encased in a fusible shell” type during hot rolling is controlled by the plasticity of the shell phase and the complex interphase interactions resulting from interfacial friction and slip. The encapsulation of undeformable inclusions such as oxides, spinels, titanium nitride, and others within a plastic silicate or sulfide shell can be regarded as an effective mechanism for reducing the brittleness of nonmetallic inclusions during hot rolling. The shape evolution of “phases are beside” inclusions during hot rolling is determined by the plasticity of the inclusion phases and by complex interphase interactions arising from interfacial friction and slip (provided a plastic phase is present). During cold rolling, the morphological evolution of “refractory phase encased in a fusible shell” inclusions is controlled by the plasticity of the sulfide shell phase, together with complex interphase interactions involving interfacial friction and cold slip along interphase boundaries inside the inclusions. In the case of “phases are beside” inclusions, their shape change during cold rolling is governed by the plasticity of the sulfide phase (if present), as well as by interfacial friction and cold slip processes. The role of plastic phases in inclusions of both types has been clarified. It is demonstrated that plastic phases and interphase boundaries play a decisive role in the morphological evolution of heterophase inclusions of the “refractory phase encased in a fusible shell” and “phases are beside” types during hot and cold rolling of steels.

**Key words:** steel, heterophase nonmetallic inclusions, refractory phase, fusible shell, phases are beside, deformation, hot rolling, cold rolling, plasticity, destruction, interphase boundaries, interphase friction.

**For citation:** Gubenko, S. I., Parusov, E. V., Chuiko, I. M., & Parusov, O. V. (2026). Features of the transformation of heterophase non-metallic inclusions during hot and cold rolling of steels. Part 1. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 40, 56-78. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-004>

*Рукопис надійшов до редакції / Received 01.11.2025*

*Рекомендовано до друку / Accepted 28.05.2026*

*Опубліковано / Published 30.05.2026*