

УДК 669.15.018.295

С. І. Губенко^{1,2}, д.т.н., проф., с.н.с., ORCID 0000-0001-6626-3979**Е. В. Парусов**¹, д.т.н., с.н.с., зав. відд., ORCID 0000-0002-4560-2043**О. В. Парусов**¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-9879-6179¹ *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*² *Придніпровська державна академія будівництва та архітектури*

ФОРМОЗМІНА І ПЕРЕРОЗПОДІЛ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В СТАЛЯХ ЗА ОБРОБКИ ТИСКОМ

Анотація. Досліджені особливості формозміни та перерозподілу неметалевих включень різних типів за обробки сталей тиском (прокатка, ковка, волочіння). Уявлення про пластичну формозміну включень розглянуто з позицій фізичної мезомеханіки гетерофазних сплавів. Показано, що неметалеві включення сприяють локалізації пластичної деформації, яка супроводжується взаємодією неметалевих включень і сталеві матриці, що визначає їх спільну пластичну формозміну та перерозподіл включень у сталевій матриці. Встановлено особливості цих процесів за різних видів та температурних режимів обробки тиском, що визначає характери напружень поблизу включень і пластичної течії сталеві матриці. Показано, що температурний режим обробки тиском визначає можливість релаксаційних процесів у сталевій матриці поблизу включень і рівень пластичності самих включень і міжфазних границь включення-матриця. Встановлено вплив температурного режиму гарячої деформації листових сталей та бунтового прокату на характер формозміни та деформівність пластичних включень та їх руйнування (крихке або в'язке), а також пластичність сталеві матриці, сили тертя на границях включення-матриця та пластичності останніх в процесі гарячої прокатки. Показано, що при розгляді пластичної поведінки неметалевих включень у пластичній сталевій матриці важливе значення має поведінка міжфазних границь включення-матриця за різних умов деформації. Вивчено особливості динамічного характеру спільної деформації системи включення-матриця, який пов'язаний з розвитком конкуруючих процесів на міжфазних границях включення-матриця: міжфазне тертя та просковзування. Обговорюються особливості гарячого та холодного просковзування, що відбуваються за різних температур деформації. Показано, що механізми кожного із зазначених процесів залежать від температурного режиму деформації, рівня пластичності включень та сталеві матриці. Встановлено вплив способу холодної деформації (прокатка та волочіння) на формозміну пластичних включень та перерозподіл недеформівних включень у сталевій матриці. Розглянуто процеси, які визначають рівень пластичності неметалевих включень і границь включення-матриця і істотно впливають на характер формозміни включень та їх перерозподілу в сталевій матриці в процесі обробки сталей тиском, що впливає на їх технологічну пластичність за різних температур та способів деформації.

Ключові слова: сталь, неметалеві включення, обробка тиском, прокатка, волочіння, пластична деформація, листовий прокат, бунтовий прокат, сталеві

матриця, міжфазні границі включення-матриця, міжфазне тертя, просковзування.

Посилання для цитування: Губенко С. І., Парусов Е. В., Парусов О. В. Формозміна і перерозподіл неметалевих включень в сталях за обробки тиском. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 407-433. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-407-433>

Актуальність проблеми. Відомо, що неметалеві включення (оксиди, сульфідні, силікати, нітриди, карбонітриди) негативно впливають на технологічні властивості сталей, оскільки часто є причиною утворення різного роду дефектів за обробки тиском, негативно впливають на гарячу і холодну технологічну пластичність, наприклад, вони можуть бути причиною червоноламкості [1-8]. Підвищення технологічної пластичності за різних умов обробки тиском є актуальною проблемою при виробництві виробів із різних марок сталей. Її рішення вимагає обов'язкового розвитку теоретичних основ впливу неметалевих включень на процеси пластичної деформації сталей за умов деформації. Останнім часом у зв'язку з розвитком релаксаційного багаторівневого підходу до проблеми пластичності твердих тіл проводяться дослідження процесів пластичної деформації на мезомасштабному рівні, використовуючи також і традиційні уявлення про деформаційну поведінку металевих матеріалів, у тому числі з гетерофазною структурою [9]. При розгляді пластичної формозміни неметалевих включень у пластичній сталевій матриці важливе значення має поведінка міжфазних границь включення-матриця за різних умов деформації.

Мета роботи – вивчення особливостей формозміни і перерозподілу неметалевих включень та їх впливу на закономірності процесів пластичної течії поблизу включень в сталях за різних умов обробки тиском.

Матеріали и методи досліджень. Поведінка включень за обробки тиском вивчали в умовах деформації на безперервному багатоклітьовому стані гарячої прокатки листових сталей 08Ю, 08Т, 08кп, 08Х18Н10Т, 12ГС, 08ГСЮТФ в інтервалі температур 1200-880 °С, кування заготовок зі сталей 08Ю, 08ГСЮТФ при температурах 1200-800 °С (в експериментальних цілях), холодної прокатки зі ступенями деформації 35-75 %, а також після гарячої пластичної деформації безперервнолітої заготовки (БЛЗ) у бунтовий прокат на багатоклітьовому прокатному стані (температура заготовки після нагріву в печі перед початком гарячої прокатки становить ~ 1100-1150 °С, температура закінчення деформації при виході металу з останньої чистової кліті дрютяного блоку ~1150-1050 °С) і волочіння сталей С82D і С86D (сумарне відносне обтиснення 85,9 %). Така невелика відмінність температур початку і закінчення деформації пов'язана з розігрівом металу в процесі гарячої деформації, що обумовлено високошвидкісним процесом її проходження (швидкість

руху розкочування в залежності від кінцевого профілерозміру прокату на дротяній лінії становить 18-100 м/с), а також незначними міжклітинними паузами порядку 7-0,05 с.

Дослідження гарячого просковзування уздовж границь включення-матриця спостерігали за високотемпературної (900-1200 °С) деформації розтягуванням у вакуумі на установці ІМАШ-5С зі швидкістю переміщення захватів 1680 мм/хв, коли відбувається вакуумне травлення, що виявляє рельєф деформації і величину зміщення рисок. За дослідженням холодного просковзування зразки сталей розтягували у вакуумі за температур 25-900 °С на установці ІМАШ-5С зі швидкістю переміщення захватів 2000 мм/хв. На поверхні зразків за допомогою приладу ПМТ-3 наносили реперні точки поблизу полюсів включення 0° та 90° по обидва боки від границі включення-матриця. Методики досліджень наведено у роботах [10, 11]. Ідентифікацію включень проводили металографічним («Neophot-31»), петрографічним та мікрорентгеноспектральним («Axiovert 200M MAT», «МС-46 Camesa») методами. Мікроструктуру сталеві матриці поблизу включень досліджували за допомогою мікроскопа «Neophot-31», трансмісійного електронного мікроскопа «JEOL JEM-100 CX» та растрових електронних мікроскопів «VEGA TS5130MM» та «JSM-35».

Результати досліджень та їх обговорення. Поведінка включень за обробки сталі тиском, зокрема деформівність, визначається такими факторами, як температура їх плавлення або розм'якшення, спосіб деформації сталі, температура і ступінь деформації, співвідношення фізико-механічних властивостей включення та матриці, яке також визначається температурою і т. п. [12, 13]. Показник чи індекс деформівності включень [10, 11, 14]:

$$\nu = \varepsilon_g / \varepsilon_m, \quad (1)$$

де ε_g і ε_m – відповідно ступінь деформації включення та матриці.

Індекс деформівності характеризує деформацію різних включень в сталевий матриці під час обробки [10, 11, 14]. Якщо $\nu = 1$, включення деформується так само, як сталева матриця, коли $\nu = 0$, включення не деформується. Ступінь пластичності включення суттєво залежить від його кристалічної структури, хімічного складу та температури [10, 11]. Опір деформації включень та сталеві матриці в залежності від температури змінюється різною мірою [10, 11, 14–21], що сприяє концентрації напружень і впливає на формозміну включень.

Механізм деформації включень за обробки тиском має велике значення для їх пластичної поведінки. Уявлення про пластичну формозміну включень слід розглядати з позицій фізичної мезомеханіки гетерофазних сплавів [9]. На включення за обробки тиском діють

нормальні стискаючі напруження від тиску деформуючого інструменту, що передаються через металеву матрицю, поздовжні зсувні напруження, що виникають в матриці під час її деформації, а також напруження тертя на поверхні розділу включення-матриця [10, 11]. Величина нормальних напружень залежить від тиску деформуючого інструменту та ступеня сумарного відносного обтиснення прокату або маршруту волочіння, зсувних – від ступеня наклепу за деформації, пластичності металевої матриці, що визначається температурою та типом і параметрами її структури (тип кристалічної решітки, фазовий склад, розміри зерен та ін).

Залежно від способу деформації, змінюється схема напруженого стану поблизу включення. Насамперед це пов'язано із загальними схемами головних деформацій та головних напружень [22]. Співвідношення між величинами напружень за різних схем напруженого стану є різними. Для різних методів обробки сталі тиском можуть бути однакові схеми головних деформацій та різні схеми головних напружень і навпаки. Осередок деформації часто розбитий на кілька ділянок, де переважаючі схеми головних напружень можуть бути різними. В процесі деформування на різних етапах напруження, що діють на включення, можуть змінюватися за величиною і навіть знаком. Пластичність та опір деформації включень залежать від схеми головних деформацій, які визначають характери перерозподілу недеформованих включень в пластичній матриці та зміни форми пластичних включень в процесі деформування. Головним чином включення перерозподіляються з утворенням рядків у напрямку позитивних деформацій. Схеми розподілу головних деформацій і головних напружень відбивають неоднорідність напружень, що діють на саме включення, які у матриці поблизу включення за різних методах деформації є різними. За всіх видів обробки сталей тиском неметалеві включення перебувають у складно-напруженому стані, що постійно змінюється в процесі деформування. Неметалеві включення змінюють форму або руйнуються в залежності від ступеня їх пластичності.

За гарячої прокатки листових сталей 08Ю, 08Т, 08кп, 08Х18Н10Т, 12ГС, 08ГСЮТФ в інтервалі температур 1100–900 °С на безперервному стані гарячої прокатки включення більшості оксидів Al_2O_3 , шпінелей $MnO \cdot Al_2O_3$, $MgO \cdot Al_2O_3$, оксидів титану TiO , Ti_2O_3 , нітридів і карбонітридів титану $TiCN$, а також ільменіту $FeO \cdot TiO_2$ пластично не деформуються і розташовуються у вигляді рядків у напрямку прокатки (рис. 1, а, б). Частина таких включень крихко руйнується. Деякі включення окису заліза виявляють слабку пластичність. Очевидно, це відбувається на кінцевих етапах прокатки за температур 900 °С і нижче, оскільки окис заліза збільшує

пластичність за зниженням температури [14].

Силікати $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ поведуться як пластична фаза сталі (рис. 1, в, г). Зустрічаються окремі вклучення чи кілька вклучень як рядки у напрямку прокатки. Аналіз показав, що після прокатки силікати мають форму еліпсоїду [23]. Іноді силікати крихко руйнувалися (рис. 1, г, д), очевидно, після пластичного видовження вклучення на останніх стадіях деформації, так як завдяки різкому підвищенню мікротвердості силікату нижче 900°C слід очікувати відповідне падіння їх пластичності [10, 11]. Окремі уламки зруйнованих силікатних вклучень можуть існувати як самостійні вклучення. Пластичні силікатні вклучення, простягаючись на значні відстані, порушують суцільність аустенітної матриці, що сприяє анізотропії властивостей сталі.

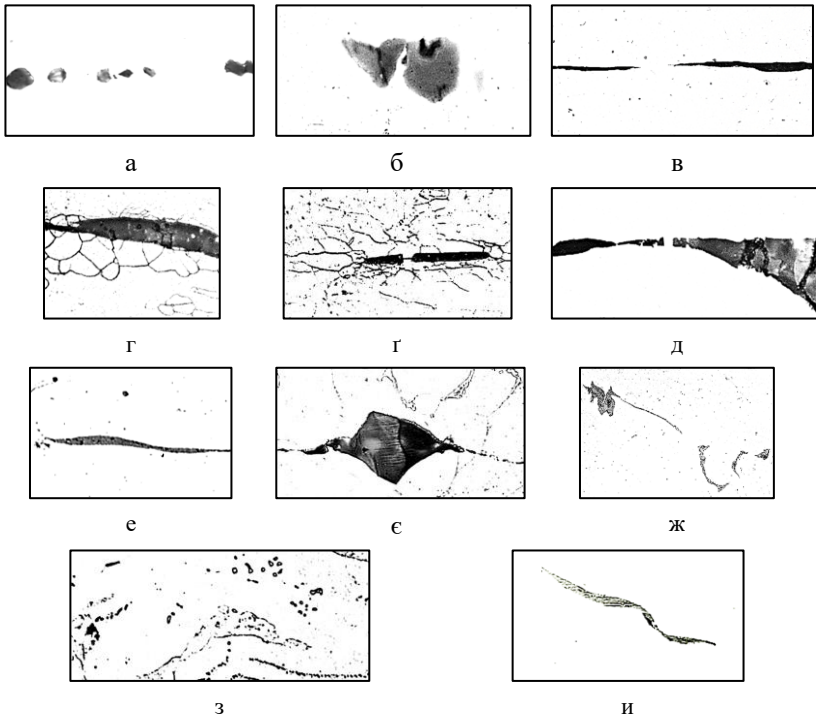


Рисунок 1 – Неметалеві вклучення ($\times 500$) після гарячої прокатки листових сталей (а-е) та гарячого кування (ж-и) сталей 08Ю, 08Т, 08кп, 08Х18Н10Т, 12ГС, 08ГСЮТФ

Пластичність залізо-манганових сульфідів ($\text{Mn, Fe}\text{S}$) за гарячої прокатки листових сталей різна (рис. 1, е). Поряд з легко деформованими вклученнями були виявлені сульфіди, що не

деформуються. Пластичність сульфідного включення збільшується із зменшенням вмісту в ньому мангану [23].

Гетерофазні включення (оксид-силікат, оксид-сульфід, карбонітрид-сульфід та ін) виявляють неоднорідну деформівність за гарячої прокатки в залежності від природи фаз (рис. 1, е). При цьому спостерігається взаємний вплив фаз включень на їх поведінку за гарячої деформації, що пов'язано з динамічною взаємодією фаз включень через внутрішні міжфазні границі [24-26].

Поведінка включень за гарячого кування також визначається їх типом. Більшість оксидів Al_2O_3 , TiO , Ti_2O_3 , шпінелей $MnO \cdot Al_2O_3$, $MgO \cdot Al_2O_3$, нітридів і карбонітридів титану $TiCN$, а також ільменіта $FeO \cdot TiO_2$ пластично не деформуються і розташовуються у вигляді рядків, які, на відміну від рядків за прокатки, мають вигнуту форму (рис. 1, ж, з), що свідчить про складну течію сталеві матриці (аустеніту) в процесі кування. Пластичні залізо-манганові силікати, сульфідні деформуються і набувають вигнутої форми (рис. 1, и).

Гаряча пластична деформація бунтового прокату являє собою складний багатопрохідний процес отримання прокату, при якому на багатоклітьового прокатному стані відбувається формозміна БЛЗ квадратного перерізу $125 \text{ мм} \times 125 \text{ мм}$ у прокат круглого перерізу з використанням системи калібрів овал \leftrightarrow круг. За гарячої деформації (прокатки) бунтового прокату за температур $1100-1150 \text{ }^\circ\text{C}$ поведінка неметалевих включень також залежить від рівня їх пластичності. Силікати SiO_2 пластично не деформуються на всіх етапах гарячої деформації, вони крихко руйнуються і перерозподіляються у смуги в напрямку деформації (рис. 2, а). Залізо-манганові силікати $FeO \cdot SiO_2$, $MnO \cdot SiO_2$ деформуються і видовжуються у напрямку прокатки, оскільки температурний інтервал деформації відповідає їх пластичному стану (рис. 2, б) [11, 27]. Форма пластичних силікатів $FeO \cdot SiO_2$, $MnO \cdot SiO_2$ постійно змінюється: вони по черзі набувають овальну та круглу форми, що пов'язано з чергуванням деформації БЛЗ у прокатних клітках з різним розташуванням валків (вертикальні та горизонтальні групи). При постійному видовженні пластичних силікатів у напрямку течії сталеві матриці відбувається зміна їх форми в поперечному перерізі. В структурі прокату ці включення в поперечному перерізі мають сферичну форму. Деякі силікатні включення під час гарячої прокатки в'язко руйнуються в процесі пластичного видовження і розкатуються у дуже тонкі стрічки (рис. 2, в). На відміну від досліджень, які викладені у роботах [10, 11], де температура гарячої деформації сталей становила менше $900 \text{ }^\circ\text{C}$ і фіксувалося крихке руйнування аналогічних видів силікатних включень після їх пластичного видовження (див. рис. 1, г, д), в даному випадку це явище не спостерігалось.

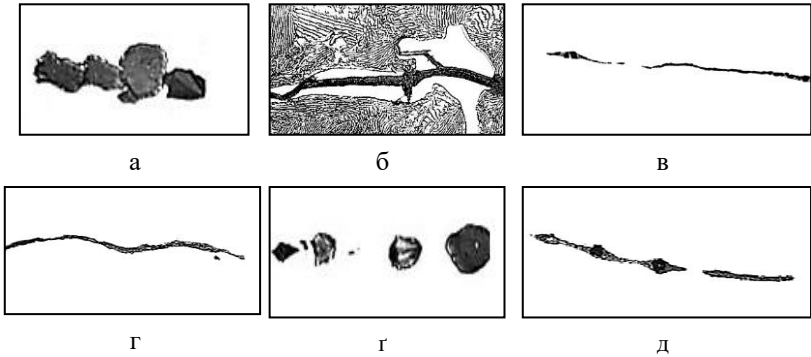


Рисунок 2 – Неметалеві включення ($\times 500 \times 2,5$) після гарячої пластичної деформації БЛЗ зі сталей С82D і С86D.

Пластичність залізоманганових сульфідів (Mn, Fe)S за гарячої прокатки виявляється різною та залежить від вмісту мангану і заліза [10, 11, 23] (рис. 2, г). Поряд з легко деформованими сульфідами виявлено слабо деформовані сульфідні частинки. Форма пластичних сульфідів постійно змінюється: вони по черзі набувають овальну та круглу форми, що пов'язано з чергуванням деформації БЛЗ у прокатних клітках з різним розташуванням валків (вертикальні та горизонтальні групи). При постійному видовженні пластичних сульфідів у напрямку течії сталеві матриці відбувається зміна їх форми в поперечному перерізі, в результаті в поперечному перерізі вони мають сферичну форму. Руйнування сульфідних включень не спостерігали.

Включення алумосилікатів, оксидів мангану, кальцію й алюмінію пластично не деформуються на всіх стадіях гарячої деформації та розташовуються у вигляді стрічок у напрямку течії сталі (рис. 2, г), частина з них крихко руйнується, а їх уламки розташовуються в стрічки у вигляді окремих фаз. Оксисульфідні $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + (\text{Mn, Fe})\text{S}$ та оксисилікатні $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ включення проявляють неоднорідну деформівність. Пластична сульфідна фаза легко деформується спільно з матрицею, а оксидна, яка знаходиться всередині включення, не змінює своєї форми (рис. 2, д). Напруження, які діють з боку аустенітної матриці, витрачаються на деформацію пластичної сульфідної фази, що не чинить опір течії сталеві матриці та легко деформується.

За умов гарячої деформації прокаткою або ковкою поведінка неметалевих включень, що визначається рівнем їх пластичності, є майже однаковою, але в залежності від схеми деформації є відмінності у формі смуг недеформівних включень та форми пластичних включень.

Тут велику роль відіграє характер течії сталевий матриці (аустеніт), який визначається схемою деформації, але у зв'язку з процесами динамічного відновлення її структури (динамічні полігонізація та рекристалізація, див. рис. 1, г, г), а також поліморфного перетворення аустеніт → ферит або евтектоїдного перетворення аустеніт → перліт не завжди можливо виявити його особливості травленням мікроструктури сталей. Ці процеси чітко виявляються при дослідженні мікроструктури сталей та зламів після холодної обробки тиском.

Слід зазначити, що температурні умови деформації листових сталей та бунтового прокату різні. У разі прокатки листа на стані безперервної прокатки температура початку деформації становила 1100 °С, температура кінця прокатки 880 °С, при цьому при переході від однієї кліти до наступної знижувалася температура поступово. Тому поступово посилювалися силові умови деформації включень внаслідок зміни їх механічних властивостей та зниження пластичності [10, 11, 23]. Це, в першу чергу, стосується пластичних силікатів $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ і сульфідів (Mn, Fe)S, оскільки оксиди, карбонітриди, нітриди не пластичні при всіх досліджуваних температурах. Руйнування силікатів відбувалося на останніх стадіях деформації, коли вони втратили пластичність, тому вони руйнувалися за крихким механізмом. За гарячої деформації бунтового прокату температура початку деформації становила 1100-1150 °С, температура закінчення деформації при виході металу з останньої чистової кліти дротового блоку 1150-1050 °С, тобто спостерігається деяка відмінність температур початку та закінчення деформації, можливе навіть деяке перевищення температури закінчення деформації щодо такої на початку прокатки, що обумовлено розігрівом металу в процесі гарячої деформації внаслідок високошвидкісного процесу (швидкість переміщення розкату в залежності від кінцевого профілерозміру на дротовому блоці складає 18-100 м/с), а також малими міжклітьовими паузами $\sim 7,0\text{-}0,05$ с. Це свідчить про температурні «гойдалки» в процесі деформації бунтового прокату, коли механічні властивості і пластичність неметалевих включень змінюються стрибкоподібно. Таким чином, пластичні сульфідів (Mn, Fe)S і силікати $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ деформуються в умовах, що постійно змінюються, тому можливе в'язке руйнування пластичних силікатів після їх пластичного подовження внаслідок підвищення температури деформації в будь-якій клітці прокатного стану. Крім того, температури кінця гарячої деформації бунтового прокату вище, ніж у разі прокатки листових сталей, тому спостерігається відмінність у механізмах руйнування силікатів $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ після їх пластичного видовження.

Відмінність температурних режимів гарячої деформації листових сталей та бунтового прокату впливає на пластичність аустенітної

матриці в контактi з включеннями. У разi прокатки листових сталей, оскільки температура поступово знижується при переходi від однієї клітi безперервного стану до наступної, також поступово знижується пластичність сталевої матриці внаслідок зміни співвідношення процесів гарячого наклепу і динамічного відновлення її структури. Тому поступово і плавно від початку до кінця прокатки посилюються умови деформації системи включення-матриця. За деформації бунтового прокату внаслідок температурних «гойдалок» співвідношення процесів гарячого наклепу і динамічного відновлення структури аустенітної матриці при переходi від однієї клітi безперервного стану до наступної змінюються стрибкоподiбно. Тому відповідно змінюється рівень пластичності сталевої матриці, а також умови деформації системи включення-матриця у процесі гарячої прокатки.

Встановлено, що підвищений вміст неметалевих включень в сталях різного призначення суттєво погіршує її деформівність за подальшої холодної деформації прокаткою, волочінням та впливає на експлуатаційні властивості металопродукції [28, 29]. За холодної деформації формозміна включень проходить в нових умовах у порівнянні з гарячою деформацією, що обумовлено, в першу чергу, різницею температур і деформуючих зусиль, а також, можливо, і способу деформації. При цьому змінюються фізико-механічні властивості включень і сталевої матриці [10, 11, 23].

В процесі холодної прокатки гарячекатаних листових низьковуглецевих сталей включення оксидів і шпінелей Al_2O_3 , $MnO \cdot Al_2O_3$, $MgO \cdot Al_2O_3$, силікатів SiO_2 , нітридів і карбонітридів титану $TiCN$ пластично не деформуються (рис. 3, а, б). У великих включеннях помітні тріщини, що призводять до їх руйнування. Уламки роздроблених включень, як і за гарячої деформації, захоплюються поточним металом феритної матриці, перемішуються щодо одне одного з формуванням рядків (рис. 3, в). Прошарок металу, збагаченого включеннями, що утворилися під час гарячої деформації, зберігаються і після холодної прокатки.

За холодної прокатки сталевих листів сульфiди пластичні (рис. 3, г), включення залізо-манганових силікатів $FeO \cdot SiO_2$, $MnO \cdot SiO_2$ руйнуються (рис. 3, г), причому поворот уламків включення свідчить про їх незалежне переміщення в феритній матриці, що також рухається. Формозміна пластичних сульфідів $(Mn, Fe)S$ продовжується в нових умовах порівняно з гарячою деформацією, коли змінюються їх механічні властивості, проте вони деформуються в напрямках прокатки і ширини листа, тобто, згідно [23], продовжують трансформуватися в оладкоподiбну форму, стаючи тоншими. Так само, як і при гарячій прокатці, у напрямках прокатки та ширини листа перерозподіляються

рядкові скупчення недеформованих включень оксидів, силікатів, карбонітрідів.

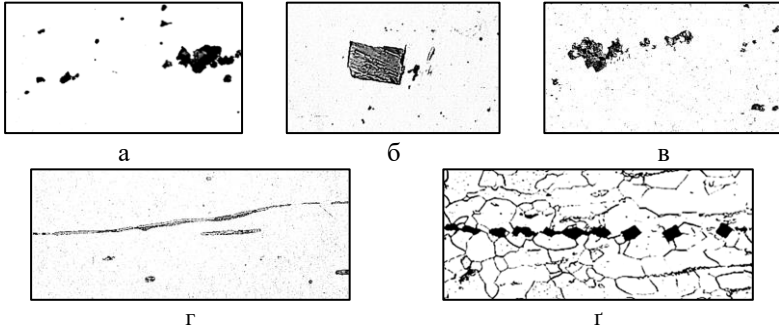


Рисунок 3 – Неметалеві включення ($\times 500$) в холоднокатаних листових сталях: а, в – Al_2O_3 , $\text{MnO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, б – TiCN , г – $(\text{Mn}, \text{Fe})\text{S}$, $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$.

За холодного волочіння бунтового прокату формозміна включень проходить в нових умовах у порівнянні з гарячою деформацією БЛЗ, що обумовлено не тільки різницею температур і деформуючих зусиль, а також способу деформації. Поведінка включень всіх типів під час волочіння пов'язана з рівнем їх пластичності за конкретної температури [10, 11, 23]. На відміну від умов гарячої деформації, за волочінням формозміна прокату, а отже, і неметалевих включень відбувається при постійному характері перерозподілу напружень в перлітній матриці, рівень яких зростає за переходом до кожної наступної монолітної волоки (осередку деформації).

Під дією складних напружень відбувається пластична деформація сульфідів (рис. 4, а). Після волочіння вони мають форму тонких стрижнів, що пов'язано з подовженням включень у напрямку волочіння. В результаті в структурі дроту ці включення у поперечному перерізі мають сферичну форму. Включення силікатів типу $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ і $\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$, які мають після гарячої деформації витягнуту форму, при волочінні виявляються не пластичними та крихко руйнуються (рис. 4, б). Включення алюмосилікатів, оксидів мангану, кальцію й алюмінію також пластично не деформуються (рис. 4, в), а уламки роздроблених включень захоплюються сталесою матрицею і трансформуються у витягнуті смуги. На відміну від листових сталей за волочіння бунтового прокату відбувається зміна схеми деформації, що впливає на формозміну пластичних сульфідів, а також перерозподіл в перлітній матриці частинок недеформованих включень. Відповідно перерозподіляються рядкові скупчення недеформованих включень, протяжність яких в

напрямку волочиння збільшується.

В процесі холодної прокатки металів або волочиння зі збільшенням ступеня деформації підвищується дисперсність включень внаслідок їх крихкого руйнування [10, 11, 23].

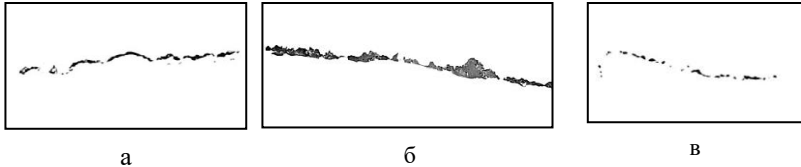


Рисунок 4 – Неметалеві включення ($\times 500 \times 2,5$) в сталях C82D і C86D після волочиння.

Таким чином, формозміна неметалевих включень та характер їх перерозподілу в металевій матриці визначаються декількома факторами. За прокатки, ковки, волочиння сталей неметалеві включення перебувають у складно-напруженому стані, який постійно змінюється у процесі деформування. Включення є концентраторами напружень і деформацій, джерелами дислокацій, вони гальмують рух дислокацій, сприяють локалізації структурних змін у сталевій матриці [10, 11]. Температурний режим обробки тиском визначає можливість проходження процесів динамічного відновлення (рекристалізації) деформованої структури сталеві матриці, які сприяють релаксації напружень поблизу включень. Уявлення про пластичну формозміну включень необхідно розглядати з позицій фізичної мезомеханіки гетерофазних сплавів. Останнім часом у зв'язку з розвитком релаксаційного багаторівневого підходу до проблеми пластичності твердих тіл проводяться дослідження процесів пластичної деформації на мезомасштабному рівні, використовуючи також і традиційні уявлення про деформаційну поведінку металевих матеріалів, у тому числі з гетерофазною структурою [10]. При розгляді пластичної поведінки неметалевих включень у пластичній сталевій матриці принципове значення мають характер течії сталеві матриці поблизу частинок та процеси, що відбуваються на міжфазних границях включення-матриця, які забезпечуються динамічний контакт системи, що деформується.

Відомо, що включення перерозподіляються з утворенням смуг головним чином у напрямку позитивних деформацій [11, 23]. Але просторова форма пластичних включень або смуг з недеформованих частинок залежить від характеру локальної течії сталеві матриці, яка визначається схемою деформації за обробки тиском. За гарячої або холодної прокатки листових сталей вільна течія сталеві матриці, яка

огинає включення, проходить головним чином у напрямку деформації (рис. 5, а, б), але спостерігається також її течія за шириною листа [23]. Відповідно пластичні сульфідні та силікатні включення мають більше подовження у напрямку прокатки, тобто мають еліпсоїдну або оладкоподібну форму. Протяжність рядків з недеформованих оксидів, силікатів, карбонітридів буде також більшою у напрямку прокатки у порівнянні з напрямком за шириною листа. Оскільки домінуючі схеми головних напружень в прокатних клітках стану виявляються різними, то змінюється і характер формозміни пластичних включень за гарячої або холодної прокатки. Цей процес супроводжується появою вихорових структурних зон поблизу включень, що свідчить про розвиток ротаційної деформації в локальних ділянках сталеві аустенітної або феритної матриці (рис. 5, в–г) і обумовлено неоднорідним розподілом напружень поблизу неметалевих включень та їх постійним перерозподілом при переході від однієї прокатної клітки до іншої. Вочевидь, такий складний характер течії сталеві матриці впливає на морфологію перлітних колоній, що утворюються під час охолодження бунтового прокату (рис. 5, д, е).

За умов волочіння прокату поблизу включень концентруються більші напруження, ніж за гарячої прокатки, що обумовлено зменшенням пластичності перлітної матриці зі зростанням сумарного обтиснення прокату і призводить до ускладнення її течії уздовж поверхні розділу з включенням. У цих умовах виникає характерна волокниста структура сталеві матриці, відбувається взаємодія між частинками включень і деформованою перлітною матрицею. Сталева матриця стикається з включеннями і вільний розвиток деформації перліту поблизу включень гальмується вже на ранніх стадіях волочіння, де спостерігається вигин пластин перлітних колоній, виникають локальні зони концентрації напружень і ділянки структури з розвитком неоднорідної деформації (рис. 5, е) [30]. На відміну від умов гарячої деформації, за умов волочіння формозміна прокату, а отже, і неметалевих включень відбувається при постійному перерозподілі напружень в сталеві матриці, рівень яких зростає при переході до кожної наступної монолітної волоки (осередку деформації). При цьому змінюється характер течії перлітної матриці, що призводить до трансформації пластичних сульфідів та смуг з недеформованих включень оксидів, силікатів, карбонітридів. Стрижнева форма сульфідів, що утворилася під час гарячої прокатки, зберігається, у поперечному перерізі вони мають сферичну форму, але значно меншого діаметра у порівнянні із гарячекатаним станом. Відповідно перерозподіляються смуги з недеформованих включень, які перерозподіляються визначно у напрямку волочіння.

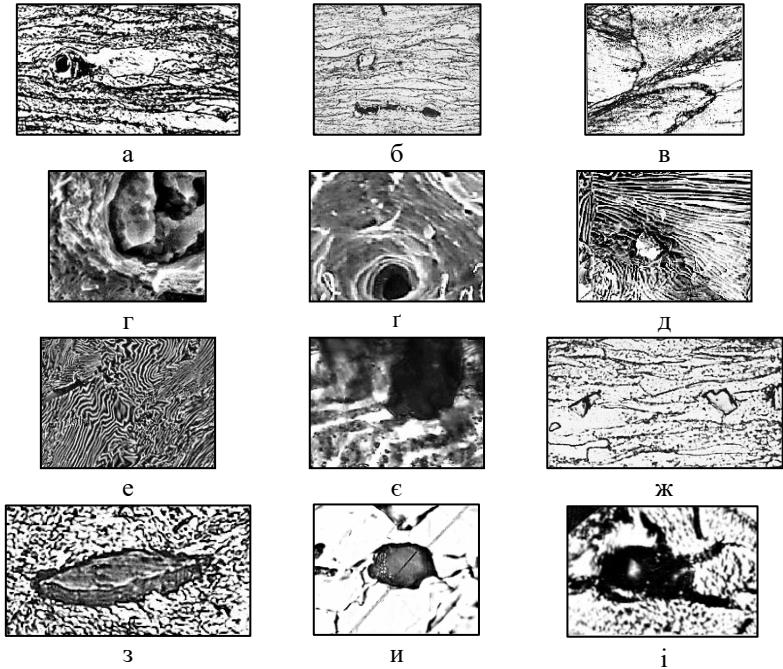


Рисунок 5 – Течія сталевій матриці поблизу включень за умов холодної прокатки сталей 08кп, 08Ю, 08Т (а–г, ж), гарячої прокатки (г–е) та волочіння сталі С82D (є), а також просковзування за різних умов деформації (з–і): а–в, є–і – $\times 500$; г, г – $\times 1500$, д, е – $\times 5000 \times 3$.

Таким чином, на включення за обробки сталей тиском діють тривимірні поля напружень, які мають складну просторову конфігурацію. Просторово неоднорідні поля напружень від деформаційного впливу, що діють на гарячої або холодної прокатки, ковки, включення, є динамічними і зазнають постійної зміни, тобто еволюціонують, що сприяє релаксаційним процесам у сталевій матриці та визначає характер перерозподілу і формозміни неметалевих включень за різних умов обробки тиском.

При розгляді поведінки неметалевих включень у пластичній сталевій матриці необхідно враховувати міжфазні границі включення-матриця, які мають різну структуру і багато в чому визначають характер взаємодії включень та сталевій матриці в процесі їхньої спільної пластичної формозміни за обробки тиском [31-34]. Слід виділити такі процеси, що відбуваються на міжфазних границях включення-матриця за пластичної деформації сталей, які є конкуруючими з точки зору їх впливу на пластичну формозміну системи включення-матриця:

міжфазне тертя та просковзування (гаряче або холодне).

В умовах високих тисків (і температур) взаємодія контактуючих поверхонь включення та сталеві матриці відбувається шляхом встановлення механічного контакту та розвитку дифузійних процесів [10, 11]. Механічний контакт встановлюється в результаті згладжування нерівностей на поверхні розділу шляхом розвитку тертя їх поверхонь одна щодо одної, що сприяє опрацюванню пари тертя включення-матриця. Між включенням і матрицею розвивається контактне тертя, яке з результатом взаємодії їх поверхонь, що перешкоджає їх відносному переміщенню. Розглянуте тертя є кінематичним сухим тертям ковзання, сили тертя переважно викликаються як чисто механічним зчепленням між нерівностями поверхонь включення і матриці, і зчепленням їх молекулами у областях безпосереднього зіткнення, тобто. на міжфазній границі. Відповідно до закону Амонтона, сила F тертя ковзання прямо пропорційна силі N нормального тиску між поверхнями тіл, що труться.

$$F = f \cdot N, \quad (2)$$

де f – безрозмірний коефіцієнт тертя ковзання, що залежить від властивостей матеріалів тіл, що труться.

Для випадку системи матриця-включення, яка деформується, більш точним є закон тертя, що враховує вплив сил тяжіння між молекулами тіл, що труться [10, 11]:

$$F = \mu(N + S\rho_0), \quad (3)$$

де μ – істинний коефіцієнт тертя; ρ_0 – додатковий тиск, спричинений силами молекулярного тяжіння; S – загальна площа безпосереднього контакту між тілами.

Сили тертя на поверхні включення-матриця при обробці сталі тиском мають також складові, які зумовлені типом і будовою межфазних границь та пов'язані з певною поверхневою енергією, а також з тертям, що виникає при переміщенні (ковзанні) міжфазних дислокацій та дисклінацій [10, 11, 28]:

$$F = \mu[N + S(\rho_0 + \gamma_{\epsilon-m} / D_{\epsilon} + \epsilon \tau_D / \ell_1 + \omega \tau_D / \ell_2)], \quad (4)$$

де $\gamma_{\epsilon-m}$ – питома поверхнева енергія границі включення-матриця; ℓ_1 і ℓ_2 – довжина рухомих міжфазних дислокацій та дисклінацій відповідно; ϵ – вектор Бюргерса міжфазних дислокацій; ω – вектор Франка міжфазних дисклінацій; τ_D – дотичне напруження деформаційного походження, що діє уздовж міжфазної границі; D_{ϵ} – розмір включення.

Сили тертя стримують течію сталевій матриці навколо включення і розподілені на границі розділу нерівномірно. Ця нерівномірність насамперед обумовлена нерівномірним розподілом нормальних напружень, що діють на включення, за різних видів обробки тиском. Наприклад, за поздовжньої прокатки тертя є мінімальним в кінцях (бічної поверхні) включення [14]. Сили тертя збільшуються зі зниженням температури, збільшенням обтиснень та розміру включення [10, 11]. Вплив температури виражається через коефіцієнт тертя, значення якого різні для різних температур. Вплив розміру та форми включення проявляються через площу контакту S (міжфазної границі), причому для різних типів включень ця величина у процесі деформації змінюється по-різному. У пластичних включень, що змінюють форму від рівноосної (компактної) до еліпсоїдної, стрижневої або хвилеподібної, величина S в процесі деформації зростає, що тягне за собою збільшення сил тертя. У недеформованих включень в процесі деформації величина S не змінюється; якщо включення руйнується, то величина S зростає, проте її вплив на сили тертя врівноважується зменшенням розмірів включень [10, 11]. Вплив ступеня деформації проявляється через збільшення щільності міжфазних дефектів.

Контактне тертя посилює неоднорідність деформації, оскільки в кожній точці поверхні контакту збуджуються елементарні дотичні сили тертя, що викликає появу додаткових дотичних напружень на міжфазній границі, спрямованих протилежно напрямку ковзання сталевій матриці щодо включення. Це може вплинути не тільки на рівень напруження, що діє на включення, але і на схему локального напруженого стану. Додаткові дотичні напруження, що виникають від сил тертя уздовж міжфазної границі, можна визначити, перетворивши рівняння $F = \mu \cdot N$ і замінивши нормальний тиск на нормальне напруження σ_n , а елементарну силу тертя на дотичне напруження τ_{mp} :

$$\tau_{mp} = \mu \cdot \sigma_n, \quad (5)$$

Максимальна величина дотичного напруження за умовою пластичності обмежується величиною границі плинності сталі, тому контактне тертя може порушити на міжфазній границі дотичне напруження, величина якого обмежена. У процесі прокатки, ковки, волочіння можливе обертання включень (рис. 5, ж), що обумовлено великими силами тертя на міжфазних границях. Обертання частинок викликає моментні напруження, що сприяє локальним пластичним поворотам у сталевій матриці і має супроводжуватися вихоровою течією матриці в контакт з включенням.

Контактне тертя породжує «мікроспалахи» температури (як джерело генерації тепла), сприяє зміні умов сполучення кристалічних решіток

включень та сталевій матриці [31]. Крім того, контактне тертя впливає на процеси гарячого та холодного просковзування уздовж міжфазних границь включення-матриця. Розглянута вище відмінність температурних режимів гарячої деформації листових сталей та бунтового прокату свідчить про неоднакову зміну сил тертя на границях включення-матриця в процесі деформації сталей. У разі гарячої прокатки листових сталей, оскільки температура знижується поступово при переході від однієї кліті безперервного стану до наступної, також поступово зростають сили міжфазного тертя на границях включення-матриця, що впливає на поведінку границь включення-матриця і їх пластичність та сприяє поступовому і плавному від початку до кінця прокатки посиленню умов деформації системи включення-матриця. За деформації бунтового прокату внаслідок температурних «гойдалок» при переході від однієї кліті безперервного стану до наступної кліті сили міжфазного тертя на границях включення-матриця змінюються стрибкоподібно. Тому відповідно змінюються поведінка границь та їх пластичність включення-матриця та умови деформації системи включення-матриця у процесі гарячої прокатки.

Розглядаючи особливості розвитку пластичної деформації системи включення-матриця за обробки сталей тиском слід враховувати взаємодію їх поверхонь в умовах контактного тертя, що призводить до згладжування шорсткості на міжфазних границях та сприяє прироблюваності пари тертя, що розглядається. Очевидно, для пластичних включень цей процес виражений сильніше, ніж у випадках включень, що не деформуються.

За умов деформації сталей за температур вище 900 °C відбувається просковзування уздовж міжфазних границь включення-матриця (рис. 5, з, и). Цей вид локальної деформації полягає у зміщенні включення та сталевій матриці один щодо одного уздовж їх поверхні розділу за рахунок здійснення деформації зсувом самої границі [24, 29-33]. Інтенсивне просковзування уздовж границь включення-матриця спостерігається за температур 1000-1200 °C, за 850-900 °C виявляють його ознаки. Воно проявляється у розширенні міжфазних границь, появі рел'єфу деформації і підтверджується фактом розриву рисок поблизу включень за досліджень методом високотемпературної металогRAFії [24, 29-33]. Це явище спостерігали як поблизу недеформованих включень корунду, шпінелей, нітриду і карбонітриду титану, так і у разі пластичних сульфідів та силікатів. Визначено величини зміщення рисок для різних типів включень і температур (табл. 1), показано, що цей процес робить істотний внесок у загальну деформацію сталі та сприяє пластичній формозміні системи включення-матриця. Встановлено також, що за температур 1000-1200 °C просковзування спостерігається

в інтервалі ступенів деформації відповідно до 25-45 % і ці ступеня деформації виявляються критичними, оскільки при їх досягненні вичерпується запас пластичності міжфазних границь включення-матриця і з'являються порожнини та тріщини поблизу включень.

Таблиця 1 – Величина зміщення рисок Δ , мкм для різних типів включень і сталей.

Включення (сталь); t, °C	Al ₂ O ₃ (08Ю)	TiCN (08Т)
1000	8	7
1100	10	9
1200	15	14

Механізмом міжфазного просковзування є рух власних дислокацій границь включення-матриця – це власне просковзування, та внесених дислокацій, причому останні можуть генеруватися джерелом у самій границі або бути внутрішньозеренними дислокаціями, які були захоплені границею та продисоціювали на граничні дислокації – це наведене просковзування. Рух власних дислокацій границь включення-матриця або внесених дислокацій, які за підвищених температур стають нестійкими і ділокалізуються, створює пластичні несумісності уздовж зазначених міжфазних границь. При делокалізації ядер дислокацій та їх русі атомна структура границь включення-матриця безперервно перебудовується і вони перебувають у структурно-нестійкому стані, що зумовлює зниження опору граничному зсуву [31, 38, 39]. Просковзування уздовж границь включення-матриця – це динамічна контактна взаємодія неметалевих включень і сталеві матриці в процесі їх спільної деформації. Динамічний контакт цих фаз можна пояснити, використовуючи модель конфігураційної локалізації валентних електронів, запропоновану у роботах [29, 40, 41]. Відповідно до цієї теорії, між неметалевим включенням і матрицею через міжфазну границю відбувається обмін електронами, оскільки включення є донором електронів, а сталева матриця – акцептором електронів. На міжфазній границі зосереджені атоми включення та матриці з найбільш порушеними електронними конфігураціями та зниженою статистичною вагою атомних стабільних конфігурацій. Міжфазні дислокації, дефекти упаковки (розщеплені дислокації), які присутні в структурі границі включення-матриця [31-33], розсіюють електрони, що рухаються через границю, за рахунок пружних та електростатичних спотворень і це впливає на електронну зонну структуру границі включення-матриця.

Таким чином, за температур 1000-1250 °C міжфазні границі включення-матриця виявляють пластичну поведінку, пов'язану з розвитком просковзування. У той же час вважається, що за нижчих температур, коли просковзування не реалізується, зазначені границі не

беруть участі у деформації. У той же час, за будь-якої температури деформації неметалеві включення знаходяться в пластичній сталевій матриці, в якій виникають і релаксують поля напружень, розвиваються складні процеси руху та перерозподілу дефектів кристалічної будови [31-33]. Очевидно, це впливає на локальні процеси пластичної релаксації в сталевій матриці.

Очевидно, розглянута вище відмінність температурних режимів гарячої деформації листових сталей та бунтового прокату свідчить про різну поведінку міжфазних границь включення-матриця, а саме про різний рівень їх пластичності внаслідок просковзування в процесі деформації сталей. Очевидно, у разі гарячої прокатки листових сталей, коли температура знижується поступово при переході від однієї кліти безперервного стану до наступної, також поступово знижується інтенсивність просковзування на границях включення-матриця, а значить, їх пластичність. Це сприяє поступовому і плавному від початку до кінця прокатки посилення умов деформації системи включення-матриця. За деформації бунтового прокату внаслідок температурних «гойдалок» при переході від однієї кліти безперервного стану до наступної кліти інтенсивність просковзування на границях включення-матриця, а значить, їх пластичність змінюються стрибкоподібно. Тому відповідно змінюються умови деформації системи включення-матриця у процесі гарячої прокатки.

Взаємодія міжфазних границь включення-матриця із зазначеними процесами за температур деформації 25-900 °С сприяє, так званому, холодному просковзуванню (рис. 1, і) [10]. Про цей процес свідчить зміщення реперних точок, величина кута обертання (зміщення) залежить від ступеня пластичності включення, а також від температури та ступеня деформації (табл. 2). Чим вище температура, тим він менше, причому цей показник зростає у всіх типів включень зі збільшенням ступеня деформації.

Таблиця 2 – Величина кута обертання (град) реперних точок за різних температур і ступенів (ϵ) деформації.

Включення, сталь	ϵ , %	Температура деформації, °С		
		25	600	900
TiCN, 08Г	5	12	8	4
	25	21	15	9
MnO·Al ₂ O ₃ , 08Ю	5	2	3	5
(Fe, Mn)S, 08кп	15	19	14	11
	25	25	17	14
MnO·SiO ₂ , 08Ю	5	12	10	7
	15	16	15	10

Зміщення реперних точок свідчить про взаємне зміщення неметалевого включення та сталевій матриці. У той же час на границях включення-матриця немає ознак традиційного високотемпературного ковзання (просковзування). Механізм холодного просковзування відрізняється від такого для високотемпературного просковзування уздовж міжфазних границь включення-матриця. Процес холодного просковзування уздовж міжфазних границь включення-матриця, очевидно, відбувається в результаті пластичного повороту або обертання включення в сталевій матриці, що деформується. Пластична деформація сталевій матриці розвивається нерівномірно [10, 11, 42, 43], що сприяє появі зон локалізованої деформації та виникненню градієнтів напружень, а також моментних напружень за будь-якої температури та швидкості деформації. Таким чином, неметалеві включення є центрами формування моментних напружень в сталевій матриці. Ці напруження і викликають пластичний поворот або обертання (прокручування) включення, але в тих випадках, коли через певні умови деформації не встигає проходити їх пластична релаксація поблизу включення. Таким чином, поблизу включень утворюються зони локалізованої деформації, що містять загальмовані скривлені фрагментовані смуги зсуву, обірвані субграниці, мікродвійники, вихорові утворення, які зумовлені ротаційною локалізацією та утворенням дискретних розорієнтувань. Очевидно, у границях включення-матриця підвищується щільність надлишкових міжфазних дефектів (внесених дислокацій та нерівноважних вакансій), що призводить до збільшення вільного об'єму цих границь [29]. Наявність ділянок ротаційної локалізації поблизу включень сприяє тому, що деформаційні мікротовихори «замітають» решіткові дефекти у границі включення-матриця. В результаті у цих границях локалізується енергія деформації, відбувається зростання спотворень та напружень, що призводить до релаксаційної перебудови їх структури та холодного просковзування.

Слід зазначити, що контактне тертя впливає на гаряче і холодне просковзування уздовж границь включення-матриця, визначаючи його ефективність. Очевидно, сила тертя F є силою опору просковзуванню, в той же час «мікроспаляхи» температури, пов'язані з контактним тертям, можуть полегшувати просковзування та спільне деформування системи включення-матриця.

Висновки

За обробки сталей тиском неметалеві включення сприяють локалізації пластичної деформації, яка супроводжується взаємодією неметалевих включень і сталевій матриці, що визначає їх спільну пластичну формозміну та перерозподіл включень у сталевій матриці. Ці процеси залежать від виду обробки тиском, який визначає характери

напружень поблизу включень і пластичної течії сталевій матриці, та температурним режимом, від якого залежить можливість релаксаційних процесів у сталевій матриці поблизу включень і рівень пластичності самих включень і міжфазних границь включення-матриця. Встановлено вплив температурного режиму гарячої деформації листових сталей та бунтового прокату на характер формозміни та деформівність пластичних включень та їх руйнування (крихке або в'язке), а також пластичність сталевій матриці, сили тертя на границях включення-матриця та пластичність останніх в процесі гарячої прокатки. Динамічний характер спільної деформації системи включення-матриця пов'язаний з розвитком конкуруючих процесів у міжфазних границях включення-матриця: міжфазне тертя та просковзування (гаряче або холодне в залежності від температури деформації). Механізми кожного із зазначених процесів залежать від температурного режиму деформації, рівня пластичності включень та сталевій матриці. Показано вплив способу холодної деформації на формозміну пластичних включень та перерозподіл недеформівних включень у сталевій матриці.

Зазначені процеси визначають рівень пластичності неметалевих включень і границь включення-матриця і істотно впливають на характер формозміни включень та їх перерозподілу в сталевій матриці в процесі обробки сталей тиском, що впливає на їх технологічну пластичність за різних температур та способів деформації.

Перелік посилань

1. 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. № 12, 4136. <https://doi.org/10.3390/ma12244136>.
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. *Material & Design*. 2020. Vol. 193. Iss. 2. P. 108801. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108801>.
3. Новокщенова С. М., Свешникова Г. А., Юнакова И. В., Гулей Г. Г. Влияние неметаллических включений на горячую технологическую пластичность стали и сплавов. В книге "Сталь и неметаллические включения". Москва : Металлургия, 1978. С. 84–94.
4. Qayyum F., Umar M., Elagin V., Kirschner M., Hoffman F. Influence of Non-Metallic Inclusions on Local Deformation and Damage Behavior of Modified 16MnCr5 Steel *Crystals*. 2022. № 12. P. 281–288. <https://doi.org/10.3390/cryst12020281>.
5. Liu N., Cheng G., Zhang L., Yang W. Composition evolution and deformation of different non-metallic inclusions in a bearing steel during hot rolling. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2022. № 4. P. 345–352. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-235>.
6. Виноград М. И., Громова Г. П. Включения в легированных сталях и

сплавах. Москва : Металлургия, 1972. 216 с.

7. Губенко С. И., Галкин А. М. К вопросу о природе красноломкости стали. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1984. № 10. С.11–15.

8. Gubenko S. I., Parusov E. V. Influence of Eutectic-Type Inclusions on the Red Brittleness of Steels. *Materials Science*. 2003. Vol. 58. №. 6. P. 731–739. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00723-0>.

9. Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В. *Структурные уровни деформации твердых тел*. Новосибирск : Наука, 1985. 229 с.

10. Губенко С. И. *Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей*. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2016. 549 с.

11. Губенко С. И., Ошкадеров С. П. *Неметаллические включения в стали*. Киев : Наукова думка, 2016. 528 с.

12. Губенко С. И., Коджаспиров Г. Е. Поведение неметаллических включений при обработке стали давлением. *Металлы*. 1994. № 1. С. 75–83.

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

14. 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. № 3. P. 148–159.

15. Шпис Х.-И. *Поведение неметаллических включений в стали при кристаллизации и деформации*. Москва : Металлургия, 1971. 125 с.

16. Rudnic S. J. Deformation of binary non-metallic inclusions. *Journal Iron and Steel Institute*. 1962. Vol. 29. № 5. P. 177–180.

17. Malkiewicz T, Rudnic S. J. Deformation of non-metallic inclusions. *Journal Iron and Steel Institute*. 1963. Vol. 201. P. 33–38.

18. André Luiz Vasconcellos da Costa e Silva. The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. № 8. P. 2408–2422. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.009>.

19. Qayyum F., Tseng Shao-Chen, Guk S., Ulrich Prah Examining the Effect of MnS Particles on the Local Deformation Behavior of 8MnCrS4-4-13 Steel by In Situ Tensile Testing and Digital Image Correlation. *Journal Composite Science*. 2023. № 7 (7), 294. <https://doi.org/10.3390/jcs7070294>.

20. Wang Y., Liu C. Evolution and Deformability of Inclusions in Steel Containing Rare-Earth Element Under Different Deoxidation Conditions. *Steel Research International*. 2022. <https://doi.org/10.1002/srin.202200027>.

21. Wang Y., Yang Y., Dong Z., Park Jh., 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. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2022. Vol. 53. P. 2182–2197. <https://doi.org/10.1007/s11663-022-02517-2>.

22. Хоникомб Р. *Пластическая деформация металлов*. Москва : Мир, 1972. 408 с.

23. Бельченко Г. И., Губенко С. И. *Неметаллические включения и качество стали*. Киев : Техника, 1980. 168 с.

24. Губенко С. И. Природа пластичности гетерофазных включений при

обработке сталей давлением. *Сталь*. 2020. № 10. С. 54–63.

25. Gubenko S. I. Plasticity Origin of Heterophase Inclusions at Steel Forming. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50. № 10. P. 730–739.

26. Губенко С. И. Гетерофазные микрокомпозитные включения в сталях. Germany-Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2019. 330 с.

27. Губенко С. И., Парусов В. В., Дервянченко И. В. Неметаллические включения в стали. Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2005. 536 с.

28. Парусов В. В., Сычков А. Б., Парусов Э. В. *Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки*. Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2012. 376 с.

29. 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* : сб. научн. тр. ИЧМ, Днепропетровск : изд. ИЧМ НАНУ, 2004. Вып. 7. С. 216–219.

30. Парусов Э. В., Губенко С. И., Сычков А. Б., Сагура Л. В., Чуйко И. Н. О поведении неметаллических включений на разных стадиях деформации при производстве высокопрочной проволоки. *Проблемы трибологии*. 2017. № 3. С. 6–15.

31. Губенко С. И. Межфазные границы включение-матрица в сталях. Межфазные границы неметаллическое включение-матрица и свойства сталей. Germany-Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2017. 506 с.

32. Губенко С. И., Иськов М. В. Структура и сопротивление разрушению межфазных границ неметаллическое включение-матрица стали. *Теория и практика металлургии*. 2004. № 5. С. 30–38.

33. Губенко С. И. К вопросу о строении межфазных границ неметаллическое включение-матрица в стали. *Металлы*. 1994. № 6. С. 105–112.

34. Губенко С. И. Локальные пики параметров и процессов на границах неметаллическое включение-матрица стали. *Сталь*. 1999. № 8. С. 64–67.

35. Губенко С. И. Природа всплесков микронеоднородной деформации в стали с неметаллическими включениями. *Физико-химическая механика материалов*. 1999. № 2. С. 53–59.

36. Губенко С. И. Роль межфазных границ включение-матрица стали в развитии релаксационных процессов вблизи неметаллических включений. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2020. № 5. С. 3–10.

37. Gubenko S. Role of Inclusion–Matrix Steel Interphase Boundaries in the Development of Relaxation Processes near Nonmetallic Inclusions. *Metal Science and Heat Treatment*. 2020. Vol. 62. P. 299–305. <https://doi.org/10.1007/s11041-020-00558-5>.

38. Губенко С. И. Релаксационные процессы вблизи включений и на межфазных границах включение-матрица стали. *Металлы*. 2021. № 3. С. 49–60.

39. Gubenko S. I. Relaxation Processes near Inclusions and at Inclusion/Matrix Interfaces. *Metally*. 2021. № 5. P. 611–620. <https://doi.org/10.1134/S0036029521050074>

40. Губенко С. И. Влияние проскальзывания вдоль границ неметаллическое включение-матрица на распределение локальной микронеоднородной деформации в армо-железе и стали. *Физика металлов и металловедение*. 1996.

Т. 82. Вып. 3. С. 167–175.

41. Самсонов Г. В., Прядко И. Ф., Прядко Л. Ф. *Конфигурационная модель вещества*. Киев : Наукова думка, 1971. 230 с.

42. Губенко С. И., Парусов Э. В. *Пластичность сплавов с различной структурой. Учебное пособие по физическим основам пластичности*. Germany-Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2017. 185 с.

43. Губенко С. *Физическая природа пластичности и упрочнения металлов при деформации*. Germany-Mauritius, Beau Bassin.: LAP LAMBERT Academic publishing, 2020. 341 с.

References

1. 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), 4136. <https://doi.org/10.3390/ma12244136>

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. *Material & Design*, 193(2), 108801. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108801>

3. Novokshchenova, S. M., Sveshnikova, G. A., Yunakova, I. V., & Guley, G. G. (1978). *Vliyaniye nemetallicheskih vklyucheniy na goryachuyu tekhnologicheskuyu plastichnost' stali i splavov* [The influence of non-metallic inclusions on the hot technological plasticity of steel and alloys]. In the book: "*Steel and non-metallic inclusions*". Moscow : Metallurgy, pp 84–94

4. Qayyum, F., Umar, M., Elagin, V., Kirschner, M., & Hoffman, F. (2022). Influence of Non-Metallic Inclusions on Local Deformation and Damage Behavior of Modified 16MnCr5 Steel *Crystals*, (12), 281–288. <https://doi.org/10.3390/cryst12020281>

5. Liu, N., Cheng, G., Zhang, L., & Yang, W. (2022). Composition evolution and deformation of different non-metallic inclusions in a bearing steel during hot rolling. *Journal of Iron and Steel Research International*, (4), 345–352. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-235>

6. Vinograd, M. I., & Gromova, G. P. (1972). *Vklyucheniya v legirovannykh stalyakh i splavakh* [Inclusions in alloy steels and alloys]. Metallurgy

7. Gubenko, S. I., & Galkin, A. M. (1984). *K voprosu o prirode krasnolomkosti stali* [On the question of the nature of the red brittleness of steel. *Metallurgy and heat treatment of metals*], 10, 11-15

8. Gubenko, S. I., & Parusov, E. V. (2003). Influence of Eutectic-Type Inclusions on the Red Brittleness of Steels. *Materials Science*, 58(6), 731–739. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00723-0>

9. Panin, V. E., Likhachev, V. A., & Grinyaev, Yu. V. (1985). *Strukturnyye urovni deformatsii tverdykh tel* [Structural levels of deformation of solids]. Nauka

10. Gubenko, S. I. (2016). *Nemetallicheskiye vklyucheniya i plastichnost' staley* [Non-metallic inclusions and ductility of steels. The physical basis of the ductility of steels]. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing

11. Gubenko, S. I., & Oshkadepov, S. P. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Naukova dumka

12. Gubenko, S. I., & Kodzhaspirov, G. E. (1994). *Povedeniye nemetallicheskih*

vklyuchenyi pri obrabotke stali davleniyem [Behavior of non-metallic inclusions during steel pressure treatment]. *Metals*, (1), 75–83

13. Belchenko, G. I., & Gubenko, S. I. (1983). Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling. *Metally*, (4), 80–84

14. 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(3), 148-159.

15. Spies, H.-I. (1971). Povedeniye nemetallicheskich vklyuchenyi v stali pri kristallizatsii i deformatsii. [Behavior of nonmetallic inclusions in steel during crystallization and deformation]. *Metallurgy*

16. Rudnic, S. J. (1962). Deformation of binary non-metallic inclusions. *Journal Iron and Steel Institute*, 29(5), 177–180

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

18. André Luiz Vasconcellos da Costa e Silva. (2019). The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications. *Journal of Materials Research and Technology*, (8), 2408-2422. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.009>

19. Qayyum, F., Tseng, Shao-Chen, Guk, S., & Ulrich, Prah. (2023). Examining the Effect of MnS Particles on the Local Deformation Behavior of 8MnCrS4-4-13 Steel by In Situ Tensile Testing and Digital Image Correlation. *Journal. Composite Science*, 7(7), 294. <https://doi.org/10.3390/jcs7070294>

20. Wang, Y., & Liu, C. (2022). Evolution and Deformability of Inclusions in Steel Containing Rare-Earth Element Under Different Deoxidation Conditions. *Steel Research International*. <https://doi.org/10.1002/srin.202200027>

21. Wang, Y., Yang, Y., Dong, Z., Park, JH., 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. *Metallurgical and Materials Transactions*, 53, 2182-2197. <https://doi.org/10.1007/s11663-022-02517-2>

22. Honeycombe, R. (1972). *Plasticheskaya deformatsiya metallov* [Plastic deformation of metals]. Mir

23. Belchenko, G. I., & Gubenko, S. I. (1980). *Nemetallicheskiye vklyucheniya i kachestvo stali* [Non-metallic inclusions and steel quality]. Technika

24. Gubenko, S. I. (2020). *Priroda plastichnosti geterofaznykh vklyuchenyi pri obrabotke staley davleniyem* [The nature of plasticity of heterophase inclusions during pressure treatment of steels]. *Steel*, (10), 54–63

25. Gubenko, S. I. (2020). Plasticity Origin of Heterophase Inclusions at Steel Forming. *Steel in Translation*, 50(10), 730-739

26. Gubenko S. *Geterofaznyke mikrokompozitnyye vklyucheniya v stalyakh*. [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Germany-Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2019. 330 p. (in Russian).

27. Gubenko, S. I., Parusov, V. V., & Derevyanchenko, I. V. (2005). *Nemetallicheskiye vklyucheniya v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. ART-PRESS

28. Parusov, V. V., Sychkov, A. B., & Parusov, E. V. (2012). *Teoreticheskiye i tekhnologicheskkiye osnovy proizvodstva vysokoeffektivnykh vidov katanki* [Theoretical and technological basis for the production of highly efficient types of wire rod]. ART-PRESS

29. Parusov, E. V., Nesterenko, A. M., Lutsenko, V. A., & Sychkov, A. B. (2004). Kriterial'naya otsenka vliyaniya nemetallicheskih vklyucheniya na obryvnost' pri volochenii kordovoy provoloki iz stali 70 [Criteria assessment of the influence of non-metallic inclusions on breakage when drawing cord wire from steel 70]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 7, 216-219
30. Parusov, E. V., Gubenko, S. I., Sychkov, A. B., Sagura, L. V., & Chuiko, I. N. (2017). *O povedenii nemetallicheskih vklyucheniya na raznykh stadiyakh deformatsii pri proizvodstve vysokoprochnoy provoloki* [On the behavior of non-metallic inclusions at different stages of deformation in the production of high-strength wire.]. *Problems of tribology*, (3), 6-15
31. Gubenko, S. I. (2017). *Mezhfaznyye granitsy vklyucheniye-matritsa v stalyakh. Mezhfaznyye granitsy nemetallicheskoye vklyucheniye-matritsa i svoystva staley* [Inclusion-matrix interfaces in steels. Non-metallic inclusion-matrix interface and properties of steels]. Germany-Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing
32. Gubenko, S. I., & Iskov, M. V. (2004). *K voprosu o stroyenii mezhfaznykh granits nemetallicheskoye vklyucheniye-matritsa v stali* [On the question of the structure of interphase boundaries non-metallic inclusion-matrix in steel]. *Theory and Practice of Metallurgy*, (5), 30-38
33. Gubenko, S. I. (1994). *K voprosu o stroyenii mezhfaznykh granits nemetallicheskoye vklyucheniye-matritsa v stali* [To the question of the structure of interphase boundaries non-metallic inclusion-matrix in steel]. *Metals*, (6), 105-112
34. Gubenko, S. I. (1999). Lokal'nyye piki parametrov i protsessov na granitsakh nemetallicheskoye vklyucheniye-matritsa stali. [Local peaks of parameters and processes at the non-metallic inclusion-matrix boundaries of steel]. *Steel*, (8), 64-67
35. Gubenko, S. I. (1999). *Priroda vspleuskov mikroneodnorodnoy deformatsii v stali s nemetallicheskim vklyuchenyami* [The nature of bursts of micro-inhomogeneous deformation in steel with non-metallic inclusions]. *Physical and chemical mechanics of materials*, (2), 53-59
36. Gubenko, S. I. (2020). *Rol' mezhfaznykh granits vklyucheniye-matritsa stali v razvitiu relaksatsionnykh protsessov vblizi nemetallicheskih vklyucheniya* [The role of steel inclusion-matrix interfaces in the development of relaxation processes near non-metallic inclusions]. *Metallurgy and heat treatment of metals*, (5), 3–10
37. Gubenko, S. (2020). Role of Inclusion–Matrix Steel Interphase Boundaries in the Development of Relaxation Processes near Nonmetallic Inclusions. *Metal Science and Heat Treatment*, 62, 299-305. <https://doi.org/10.1007/s11041-020-00558-5>
38. Gubenko, S. I. (2021). *Relaksatsionnyye protsessy vblizi vklyucheniya i na mezhfaznykh granitsakh vklyucheniye-matritsa stali* [Relaxation processes near inclusions and at inclusion-matrix interfaces of steel]. *Metals*, (3), 49-60
39. Gubenko, S. I. (2021). Relaxation Processes near Inclusions and at Inclusion/Matrix Interfaces. *Metals*, 2021(5), 611-620. <https://doi.org/10.1134/S0036029521050074>
40. Gubenko, S. I. (1996). *Vliyaniye proskal'zyvaniya vdol' granits nemetallicheskoye vklyucheniye-matritsa na raspredeleniye lokal'noy mikroneodnorodnoy deformatsii v armko-zheleze i stali*. [Influence of slippage along the boundaries of a non-metallic inclusion-matrix on the distribution of local micro-inhomogeneous deformation in armco iron and steel]. *Physics of metals and metal*

science, 82(3), 167-175.

41. Samsonov, G. V., Pryadko, I. F., & Pryadko, L. F. (1971). *Konfiguratsionnaya model' veshchestva* [Configuration model of matter]. Naukova Dumka

42. Gubenko, S. I., & Parusov, E. V. (2017). *Plastichnost' splavov s razlichnoy strukturoy. Uchebnoye posobiye po fizicheskim osnovam plastichnosti* [Plasticity of alloys with various structures. Study Guide on the Physical Basics of Plasticity]. Palmarium academic publishing

43. Gubenko, S. (2020). *Fizicheskaya priroda plastichnosti i uprochneniya metallov pri deformatsii* [Physical nature of plasticity and strengthening of metals upon deformation]. LAP LAMBERT academic publishing

S. I. Gubenko^{1,2}, D. Sc. (Tech.), Professor, Senior Researcher, ORCID 0000-0001-6626-3979

E. V. Parusov¹, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, Head of Department, ORCID 0000-0002-4560-2043

O. V. Parusov¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-9879-6179

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

² *Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture*

THE SHAPE CHANGE AND REDISTRIBUTION OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN STEELS DURING WORKING BY PRESSURE

Abstract. Peculiarities of the shape change and redistribution of non-metallic inclusions of various types during working by pressure of steels (rolling, forging, drawing) were investigated. The concept of plastic deformation of inclusions is considered from the standpoint of physical mesomechanics of heterophase alloys. It is shown that non-metallic inclusions contribute to the localization of plastic deformation, which is accompanied by the interaction of non-metallic inclusions and the steel matrix, which determines their common plastic change in shape and redistribution of inclusions in the steel matrix. The peculiarities of these processes under different types and temperature regimes of working by pressure, which determines the nature of stresses near the inclusions and the plastic flow of the steel matrix, have been established. It is shown that the temperature regime of pressure treatment determines the possibility of relaxation processes in the steel matrix near the inclusions and the level of plasticity of the inclusions themselves and the inclusion-matrix interphase boundaries. The influence of the temperature regime of hot deformation of sheet steels and wire rod on the nature of shape change and the deformability of plastic inclusions and their destruction (brittle or ductile), as well as the plasticity of the steel matrix, frictional forces at the inclusion-matrix boundaries, and the plasticity of the latter during hot rolling were established. It is shown that when considering the plastic behavior of non-metallic inclusions in a plastic steel matrix, the behavior of the inclusion-matrix interphase boundaries under different deformation conditions is of great importance. Peculiarities of the dynamic character of the joint deformation of the inclusion-matrix system, which is associated with the development of competing processes at the interphase boundaries of the inclusion-matrix: interphase friction and slipping, have been studied. The features of hot and

cold slipping occurring at different deformation temperatures are discussed. It is shown that the mechanisms of each of the mentioned processes depend on the temperature regime of the deformation, the level of plasticity of the inclusions and the steel matrix. The influence of the method of cold deformation (rolling and drawing) on the shape change of plastic inclusions and the redistribution of non-deformable inclusions in the steel matrix was established. The processes that determine the level of plasticity of non-metallic inclusions and inclusion-matrix boundaries and significantly affect the nature of the shape change of inclusions and their redistribution in the steel matrix in the process of the working by pressure of steels, which affect their technological plasticity at different temperatures and methods of deformation, are considered.

Key words: steel, non-metallic inclusions, working by pressure, rolling, drawing, plastic deformation, sheet steel, wire rod, steel matrix, inclusion-matrix interphase boundaries, interphase friction, slipping.

For citation: Gubenko, S. I., Parusov, E. V., & Parusov, O. V. (2023). The shape change and redistribution of non-metallic inclusions in steels during working by pressure. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 407-433. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-407-433>

*Стаття надійшла до редакції збірника 27.10.2023 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*