

УДК 669.15.018.295

ЕВОЛЮЦІЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ ЗА ГАРЯЧОГО ВАЛЬЦЮВАННЯ СТАЛЕЙ

С. І. ГУБЕНКО, Е. В. ПАРУСОВ

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Дніпро

Досліджено особливості трансформації різних типів неметалевих включень, а також їх руйнування за гарячого вальцювання листових сталей та бунтового прокату залежно від температурних та силових режимів. Показано, що відмінність параметрів технологічних процесів гарячої деформації обумовлює відмінності формозміни та перерозподілу включень у сталевій матриці, а також конкурентних явищ, які їх супроводжують (контактного тертя та проковзування на межах включення–матриця). Проаналізовано особливості фізико-хімічної механіки неметалевих включень у сталях за гарячого вальцювання.

Ключові слова: *сталь, гаряче вальцювання, неметалеві включення, листовий та бунтовий прокати, міжфазні межі включення–матриця, дефекти, пластичність, руйнування.*

Peculiarities of the transformation of non-metallic inclusions of various types, as well as their fracture during hot rolling of sheet steels and wire rod products, depending on the temperature and force regimes along the entire route of pressure treatment, were studied. It is shown that the differences in the parameters of technological processes of hot deformation determines the differences in the processes of shape change and redistribution of inclusions in the steel matrix, as well as competing phenomena which accompany them (contact friction and slipping at the inclusion-matrix boundaries). The processes which determine the peculiarities of the physicochemical mechanics of the non-metallic inclusions in steels during hot rolling are discussed.

Key words: *steel, hot rolling, non-metallic inclusions, sheet and wire rod rollings, inclusion-matrix interphase boundaries, defects, plasticity, destruction.*

Вступ. Неметалеві включення (оксиди, сульфіді, силікати, нітриди, карбонітриди) негативно впливають на гарячу технологічну пластичність сталей за обробки тиском [1–5]. Для вирішення цієї проблеми необхідно дослідити трансформацію неметалевих включень зі застосуванням релаксаційного багаторівневого підходу до аналізу пластичності металевих матеріалів з гетерофазною структурою [6]. Неметалеві включення призводять до послаблення механічних властивостей сталей, а під час експлуатації сприяють зниженню довговічності конструкцій, деталей машин і механізмів [7–10]. Тому важливо створити інноваційні підходи до інженерії неметалевих включень у сталях, відкоригувати режими деформаційних обробок, що підвищить їх технологічні та експлуатаційні властивості.

Мета дослідження – вивчити особливості трансформації неметалевих включень за різних умов гарячого вальцювання сталей.

Матеріали та методики. Трансформацію неметалевих включень вивчали за деформації на безперервному багатокітьовому стані гарячого вальцювання листових сталей 08Ю, 08Т, 08кп, 08Х18Н10Т, 12ГС, 08ГСЮТФ в інтервалі температур 1100...880°C, а також безперервнолитої заготовки (БЛЗ) бунтового прокату зі сталей

C82D і C86D (температура заготовки перед початком вальцювання ~ 1100...1150°C, завершення деформації при виході металу з останньої чистової кліті дрютяного блоку ~ 1150...1050°C). Ідентифікували включення металографічним ("Neophot-31"), петрографічним [5] та мікрорентгеноспектральними методами ("Axiovert 200M MAT", JSM 6360 LA зі системою JED-2300 для енергодисперсійного рентгено-спектрального мікроаналізу). Це дало змогу аналізувати у вторинних електронах, режимі кольорового картування та лінійного сканування, а також отримати спектрограми, що дозволило визначити їх поелементний хімічний та фазовий склад (рис. 1). Мікроструктуру сталеві матриці та дефекти поблизу включень досліджували за допомогою оптичного мікроскопа "Neophot-31" та растрового електронного мікроскопа JSM-35.

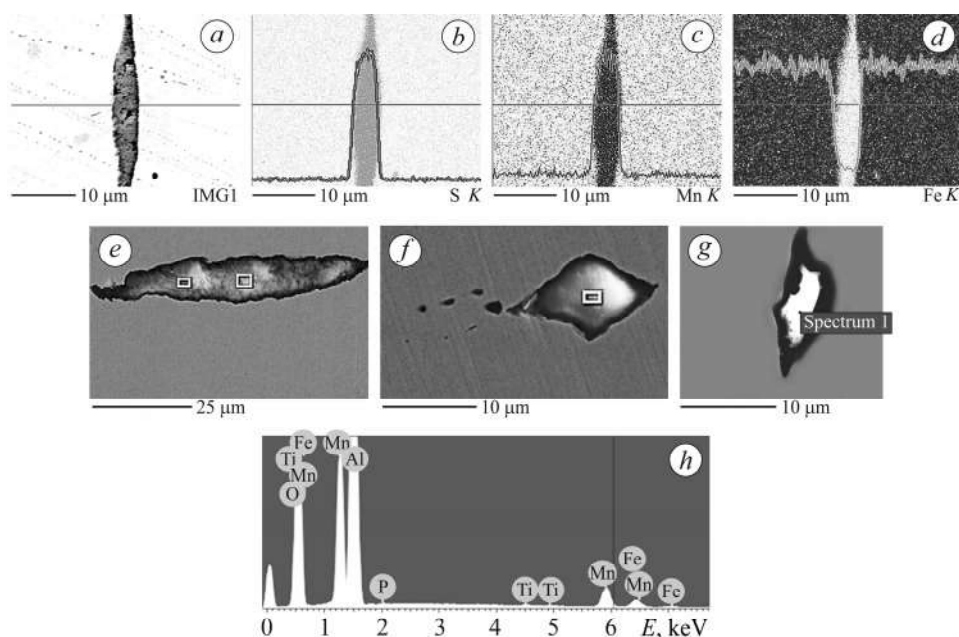


Рис. 1. Приклади ідентифікації неметалевих включень (розподіл S (b), Mn (c), Fe (d)).

Fig. 1. Examples of identification of non-metallic inclusions (distribution of S (b), Mn (c), Fe (d)).

Результати досліджень та їх обговорення. Відомо, що у деформованих сталях поблизу неметалевих включень утворюються різного роду дефекти: конічні порожнини (рис. 2a), які виникають при огинанні включень волокнами сталеві матриці, в т.ч. під час руйнування включень (рис. 2b); сферичні порожнини, які формуються за охолодження сталі після деформації через відмінність коефіцієнтів термічного розширення включення та матриці (рис. 2c); грубі розшарування великої протяжності у скупченнях включень (рис. 2d, e).

Поведінка або ступінь пластичності неметалевих включень за обробки тиском залежить від їх типу, температури плавлення або розм'якшення, можливості поліморфних перетворень, температурно-швидкісних умов деформації, співвідношення фізико-механічних властивостей включення та сталеві матриці тощо [5, 11]. Індекс пластичності включень v визначають як відношення ступенів деформації включення ϵ_{in} та сталеві матриці ϵ_m [5, 12]. Якщо $v = 1$, включення деформується як сталеві матриця, коли $v = 0$, воно не деформується. Ступінь пластичності включення суттєво залежить від його кристалічної структури, хімічного складу та температури [5, 12]. Опір деформації включень та сталеві матриці за-

лежно від температури змінюється різною мірою [5, 12–15], що сприяє концентрації напружень і впливає на формозміну включень.

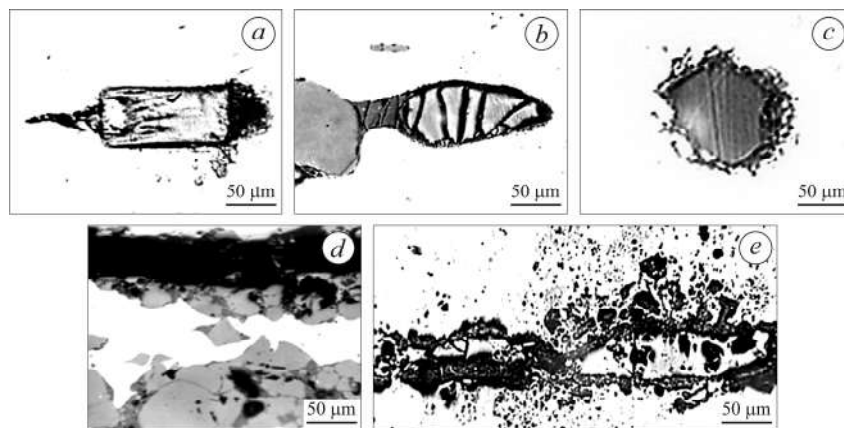


Рис. 2. Порожнини та розшарування поблизу неметалевих включень у деформованих листових сталях.

Fig. 2. Cavities and delamination near non-metallic inclusions in deformed sheet steels.

Механізм деформації включень за гарячої обробки тиском визначає їх вплив на рівень пластичності сталей. Пластичну формозміну включень та їх перерозподіл у сталевій матриці необхідно розглядати з позицій фізичної мезомеханіки гетерофазних сплавів із застосуванням релаксаційного багаторівневого підходу [6]. Відомо, що на неметалево включення за обробки тиском діють нормальні стискувальні напруження від деформувального інструмента, які передаються через металеву матрицю, поздовжні зсувні напруження, які виникають у матриці під час її деформації, а також напруження тертя на поверхні розділу включення–матриця [5]. Нормальні напруження залежать від тиску деформувального інструмента та ступеня сумарного відносного обтиснення прокату, зсувні напруження – від ступеня наклепу та пластичності металеві матриці, які визначає температура, а також тип і параметри її структури. Залежно від способу деформації змінюється напружений стан поблизу включення, що пов'язано зі загальними схемами головних деформацій та напружень [16]. Співвідношення між значеннями головних напружень та схеми напруженого стану за різних методів обробки сталей тиском відрізнятимуться. На різних етапах деформування напруження, які діють на включення, змінюватимуться за значенням і навіть знаком. Пластичність та опір деформації включень залежать від схеми головних деформацій, які визначають характер перерозподілу недеформованих включень в пластичній матриці та зміни форми пластичних включень під час деформування. Здебільшого включення перерозподіляються з утворенням смуг у напрямку позитивних деформацій. За всіх видів обробки сталей тиском неметалеві включення перебувають у складно-напруженому стані, який постійно змінюється під час деформування [5, 11], вони змінюють форму або руйнуються залежно від ступеня пластичності.

За гарячого вальцювання листових сталей 08Ю, 08Т, 08кп, 08Х18Н10Т, 12ГС, 08ГСЮТФ (сляб → смуга завтовшки 3 mm) в інтервалі температур 1100...880°C на безперервному стані включення оксидів Al_2O_3 , TiO , Ti_2O_3 , шпінелей $MnO \cdot Al_2O_3$, $MgO \cdot Al_2O_3$, нітридів і карбонітридів титану $TiCN$, ільменіту $FeO \cdot TiO_2$ не деформуються, а розташовуються смугами у напрямку вальцювання (рис. 3а). Частина таких включень крихко руйнується. Деякі включення окису заліза FeO виявляють низьку пластичність за температур 900°C. Силікати $FeO \cdot SiO_2$, $MnO \cdot SiO_2$ є пластичними (рис. 3б). Іноді вони крихко руйнувалися після пластичного подовження

на останніх стадіях деформації за температур нижче 900°C (рис. 3с), коли очікували зниження їх пластичності [5, 11]. Залізо-манганові сульфіди (Mn,Fe)S за гарячого вальцювання листових сталей мають різну пластичність (рис. 3d), яка збільшується зі зменшенням вмісту мангану [11]. Гетерофазні включення (оксид-силікат, оксид-сульфід, карбонітрид-сульфід та ін.) деформуються неоднорідно залежно від природи фаз (рис. 3е, f). При цьому спостерігаємо взаємний вплив фаз включень за гарячої деформації через внутрішні міжфазні межі [17].

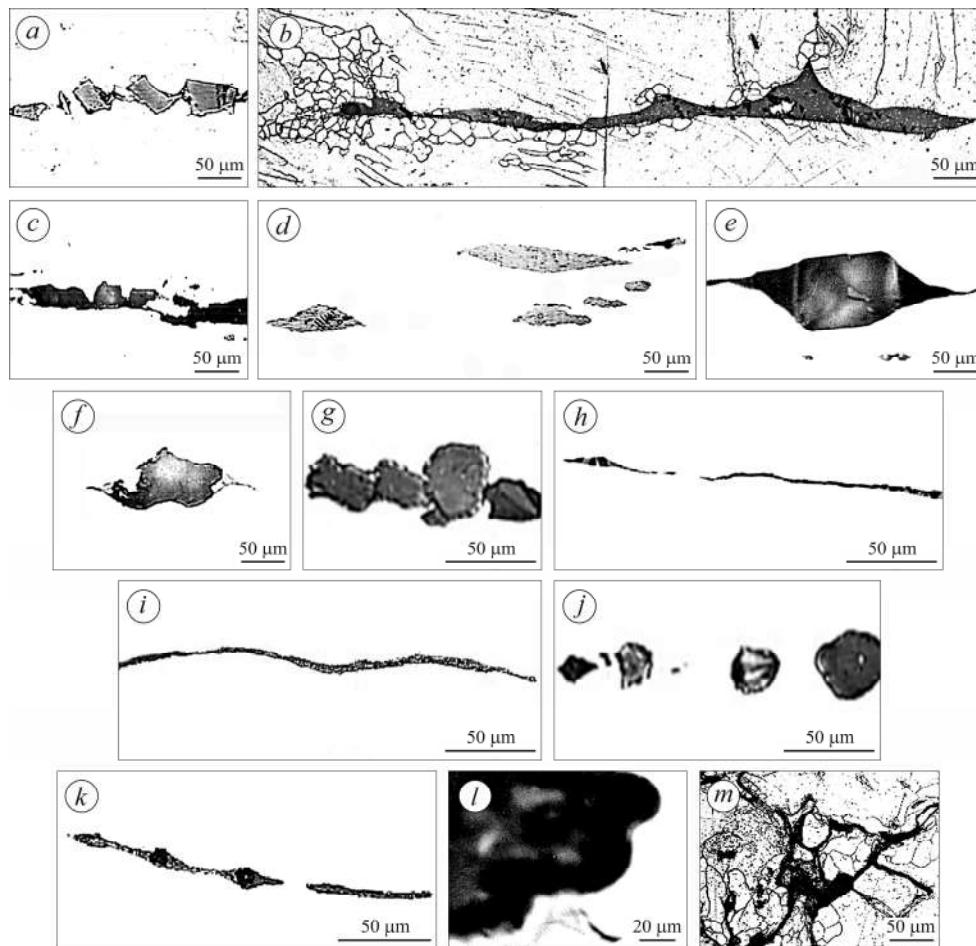


Рис. 3. Неметалеві включення TiO , Ti_2O_3 (a), $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ (b, c, h), $(\text{Mn,Fe})\text{S}$ (d, i, m), $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ (e, l), $\text{MnO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{Mn, Fe})\text{S}$ (f, k), SiO_2 (g), CaO (j) після гарячого вальцювання листових сталей 08Ю, 08Т, 08кп, 08Х18Н10Т, 12ГС, 08ГСЮТФ (a–f, l, m) та деформації БЛЗ зі сталей С82D і С86D (g–k).

Fig. 3. Non-metallic inclusions TiO , Ti_2O_3 (a), $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ (b, c, h), $(\text{Mn,Fe})\text{S}$ (d, i, m), $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ (e, l), $\text{MnO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{Mn, Fe})\text{S}$ (f, k), SiO_2 (g), CaO (j) after hot rolling of sheet steels 08Ю, 08Т, 08кп, 08Х18Н10Т, 12ГС, 08ГСЮТФ (a–f, l, m) and after hot deformation of continuous casted billet (CCB) made of С82D and С86D steels (g–k).

За температур деформації бунтового прокату 1100...1150°C поведінка неметалевих включень залежить від їх пластичності. Силікати SiO_2 пластично не деформуються, крихко руйнуються і перерозподіляються у смуги в напрямку деформації (рис. 3g). Силікати $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ деформуються і видовжуються у напрямку вальцювання, оскільки температурний інтервал деформації відповідає їх пластичному стану [5]. Деякі силікатні включення під час гарячого валь-

цювання в'язко руйнуються під час пластичного видовження і розкатуються у дуже тонкі стрічки (рис. 3h). Пластичність сульфідів (Mn, Fe)S за гарячого вальцювання залежить від вмісту мангану і заліза [5, 11, 14, 15] (рис. 3i). Руйнування сульфідних включень не спостерігали. Включення алюмосилікатів, оксидів мангану, кальцію й алюмінію пластично не деформуються на всіх стадіях гарячої деформації і розташовуються у вигляді стрічок у напрямку плинності сталі (рис. 3j), частина з них крихко руйнується, а їх уламки розміщуються стрічками окремих фаз. Оксисульфідні $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + (\text{Mn}, \text{Fe})\text{S}$ та оксисилікатні $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ включення деформуються неоднорідно. Пластична сульфідна або силікатна фаза деформується спільно зі сталеву матрицею, а оксидна, яка знаходиться всередині включення, форми не змінює (рис. 3k).

Механізм руйнування неметалевих включень за гарячого вальцювання залежить від їх типу і температури деформації: крихке руйнування недеформованих і мало пластичних включень, про що свідчить морфологія їх уламків (рис. 3a, 4a); в'язке руйнування пластичних і мало пластичних включень (рис. 4b); крихке (рис. 3c і 4c) або в'язке руйнування (рис. 3h) включень, які на початку деформації пластично видовжились (за температур 1100...950°C), а потім до кінця вальцювання внаслідок зниження температури до 900°C і нижче втратили пластичність [5, 11]; руйнування уздовж межі поділу фаз у гетерофазних включеннях (рис. 4d); руйнування легкоплавких сульфідів або силікатів, яке супроводжується їх плавленням (рис. 3m) і викликає червоноламкість сталей [18].

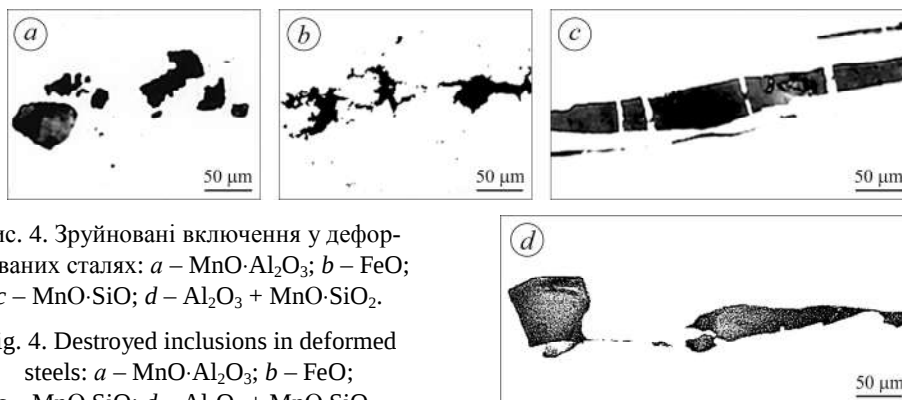


Рис. 4. Зруйновані включення у деформованих сталях: а – $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; б – FeO ; в – $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$; г – $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$.

Fig. 4. Destroyed inclusions in deformed steels: a – $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; b – FeO ; c – $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$; d – $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$.

За температурних режимів гарячої деформації листових сталей та бунтового прокату поведінка неметалевих включень відповідних типів є майже однаковою, але виявили різницю у механізмах руйнування пластичних силікатів $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ після їх пластичного видовження, оскільки температурні умови на різних стадіях деформації трохи відмінні. За безперервного вальцювання листової сталі температура початку деформації становила 1100°C, а температура завершення 880°C, при цьому за переходу від однієї кліти до наступної температура знижувалася поступово. Тому поступово посилювалися силові умови деформації включень внаслідок зміни їх механічних властивостей та зниження пластичності [5, 11]. Силікати руйнувались на останніх стадіях деформації (нижче 900°C), коли втратили пластичність, за крихким механізмом. За гарячої деформації бунтового прокату температура початку деформації становила 1100...1150°C, а температура завершення за виходу металу з останньої чистової кліти дротяного блока 1150...1050°C, можливе навіть деяке її перевищення початкової. Таке явище обумовлено розігрівом металу під час гарячої деформації внаслідок високошвидкісного процесу (швидкість переміщення розкату залежно від кінцевого профілероз-

міру на дрововому блоці 18...100 m/s), а також малими міжклітьовими паузами $\sim 7,0...0,05$ s. Це свідчить про температурні “гойдалки” під час деформації бунтового прокату, коли механічні властивості і пластичність неметалевих включень на різних етапах вальцювання змінюються стрибкоподібно. Таким чином, пластичні силікати $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ деформуються в умовах, які постійно змінюються, тому можливе їх в’язке руйнування після пластичного видовження внаслідок підвищення температури деформації в будь-якій кліті прокатного стану. Крім того, температура завершення гарячої деформації бунтового прокату суттєво вища 900°C , що відповідає умовам пластичної поведінки вказаних типів силікатних включень [5, 11].

Відмінність температурних режимів гарячої деформації листових сталей та бунтового прокату впливає на пластичність аустенітної матриці за контакту з включеннями, що визначає особливості локальних релаксаційних процесів. У разі вальцювання листових сталей, коли температура поступово знижується за переходу від однієї кліті безперервного стану до іншої, також поступово зменшується пластичність сталеві матриці внаслідок зміни співвідношення процесів гарячого наклепу і динамічного відновлення її структури. Тому поступово і плавно від початку до кінця вальцювання утруднюються умови деформації системи включення–матриця. За деформації бунтового прокату внаслідок температурних коливань співвідношення цих процесів змінюються стрибкоподібно. Тому змінюється рівень пластичності сталеві матриці, а також умови деформації системи включення–матриця під час гарячого вальцювання. За усіх умов гарячого вальцювання включення є концентраторами напружень і деформацій, джерелами дислокацій, сприяють локалізації структурних змін у сталевій матриці [5].

Формозміну неметалевих включень та характер їх перерозподілу у металевій матриці визначають схеми напруженого стану під час деформації. Гаряче вальцювання різних видів металопродукції має відмінності, що впливає на просторову форму смуг недеформівних включень оксидів, нітридів, карбонітридів та форму пластичних включень залізо-манганових силікатів і сульфідів, які залежать від характеру плинності сталеві матриці (аустеніту). Через динамічне відновлення її структури (динамічні полігонізація та рекристалізація, див. рис. 3b), а також поліморфне перетворення аустеніт $\rightarrow$ ферит, або евтектоїдне перетворення аустеніт $\rightarrow$ перліт не завжди можна виявити особливості плинності сталеві матриці поблизу включень травленням мікроструктури сталей. Включення перерозподіляються з утворенням смуг здебільшого у напрямку вальцювання. За гарячого вальцювання листових сталей плинність сталеві матриці, яка огинає включення, є головно у напрямку деформації, але спостерігаємо її також за шириною листа [11]. Відповідно пластичні сульфідів, силікатів, а також гетерофазні включення більше видовжені у напрямку вальцювання, тобто мають еліпсоподібну форму. Під час гарячого вальцювання ці включення зберігають форму еліпсоїда, розмір осей яких постійно змінюється [11]. Протяжність смуг з недеформівних оксидів, силікатів, карбонітридів також є більшою у напрямку вальцювання, ніж поперек нього (рис. 5).

Гаряча деформація бунтового прокату зі сталей C82D і C86D – це складний процес, за якого на багатоклітьового прокатному стані відбувається формозміна БЛЗ квадратного перерізу 125×125 mm у круглий з використанням системи калібрів овал $\leftrightarrow$ круг. Оскільки домінувальні схеми головних напружень у прокатних клітях різні, то змінюється і характер формозміни пластичних включень та просторового перерозподілу недеформівних включень за гарячого вальцювання порівняно з вальцюванням листів. Форма пластичних силікатів постійно змінюється: вони по черзі набувають овальної та круглої форми, що пов’язано з чергуванням деформації БЛЗ у прокатних клітях з різним розташуванням валків (вер-

тикальні та горизонтальні групи). За постійного видовження пластичних силікатів і сульфідів у напрямку плинності сталеві матриці їх форми змінюються у поперечному перерізі. Пластичні сульфідні та силікатні, а також гетерофазні включення, витягуючись у напрямку головної плинності сталеві матриці, набувають стрижневої форми, тобто у поперечному перерізі вони мають сферичну (рис. 5). Відповідно смуги з недеформованих включень мають протяжність у напрямку вальцювання, у поперечному перерізі бунтового прокату – це компактні скупчення (рис. 5). Цей процес обумовлює неоднорідний розподіл напружень і супроводжується появою вихрових структурних зон поблизу включень [5], що свідчить про розвиток ротаційної деформації в локальних ділянках сталеві аустенітної матриці і викликає поворот включень та їх постійний перерозподіл за переходу від однієї прокатної кліти до іншої.

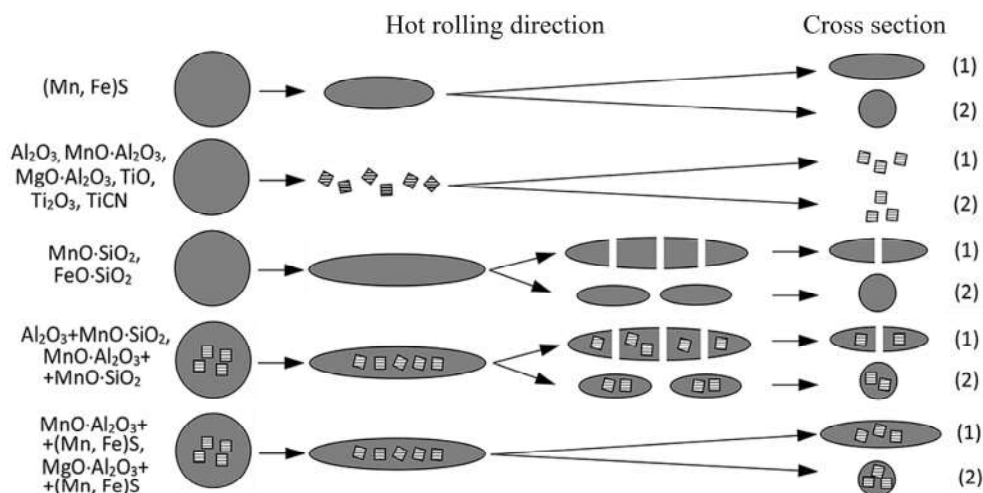


Рис. 5. Схематична ілюстрація трансформації неметалевих включень за горячого вальцювання листів (1) та бунтового прокату (2).

Fig. 5. Schematic illustration of the transformation of non-metallic inclusion during hot rolling of sheet (1) and wire rod products (2).

Розглядаючи трансформацію неметалевих включень, необхідно враховувати процеси, які відбуваються на міжфазних межах включення–матриця, які забезпечують динамічні контакти гетерофазної системи [5]. Між включенням і сталеві матрицею розвивається контактне тертя (тертя ковзання), що перешкоджає їх відносному переміщенню. В кожній точці поверхні контакту збуджуються елементарні дотичні сили тертя, що викликає появу додаткових дотичних напружень на міжфазній межі, спрямованих протилежно напрямку ковзання сталеві матриці щодо включення. Це може вплинути не тільки на рівень напруження, яке діє на включення, але і на схему локального напруженого стану. Контактне тертя породжує “мікроспалахи” температури (як джерело генерації тепла), сприяє зміні умов сполучення кристалічних ґраток включень та сталеві матриці. Крім того, контактне тертя впливає на проковзування уздовж міжфазних меж включення–матриця, яке відбувається за температур горячого вальцювання сталей (див. рис. 3/). Цей вид локальної деформації полягає у зміщенні включення та сталеві матриці уздовж їх поверхні розділу внаслідок зсуву самої межі [5]. Інтенсивне проковзування уздовж меж включення–матриця спостерігаємо за температур 1000...1200°C як для недеформованих включень корунду, шпінелей, нітриду і карбонітриду титану, так і для пластичних сульфідів та силікатів. Механізмом міжфазного проковзування є рух власних дислокацій меж включення–матриця та внесених ґратко-

вих дислокацій, які дисоціюють з утворенням граничних дислокацій. Визначено, що цей процес сприяє пластичній формозміні системи включення–матриця [5].

Контактне тертя та проковзування є конкурентними процесами, які визначають пластичність міжфазних меж включення–матриця та умови трансформації неметалевих включень за гарячого вальцювання. Розглянута вище відмінність температурних режимів гарячої деформації листових сталей та бунтового прокату свідчить про неоднакову зміну сил тертя та інтенсивності проковзування на межах включення–матриця під час процесу за переходу від однієї кліті безперервного стану до іншої. За гарячого вальцювання листових сталей зі зниженням температури деформації поступово зростають сили міжфазного тертя та знижується інтенсивність проковзування, що впливає на пластичність меж включення–матриця та сприяє плавному (від початку до завершення процесу) посиленню деформації системи включення–матриця; за деформації бунтового прокату сили міжфазного тертя та пластичність меж включення–матриця змінюються стрибкоподібно, тому відповідно змінюються умови деформації системи включення–матриця під час процесу.

Показано [5], що трансформація неметалевих включень за гарячого вальцювання може супроводжуватися фазовими перетвореннями у самих включеннях, частковим розчиненням їх поверхневих шарів та насиченням сталеві матриці компонентами включень, тобто дифузійною взаємодією включень і сталеві матриці (див. рис. 2e), що прискорюється рухом дефектів кристалічної будови. Перераховані явища можуть відбуватись і під час нагріву заготовок перед гарячим вальцюванням, що впливає на поведінку включень та міжфазних меж включення–матриця під час деформації [5].

ВИСНОВКИ

За гарячого вальцювання трансформація неметалевих включень залежить від їх типу, схеми напруженого стану та пластичної плинності сталеві матриці, температурних та силових режимів на усьому маршруті обробки сталей тиском. Відмінність параметрів технологічних процесів гарячої деформації листових сталей та бунтового прокату обумовлює різницю формозміни та перерозподілу включень у сталевій матриці, а також явищ, які їх супроводжують (контактного тертя та проковзування на межах включення–матриця). Результати досліджень дають змогу створити інноваційні підходи до інженерії неметалевих включень у різних сталях, відкоригувати режими деформаційних обробок та підвищити технологічну пластичність.

1. *Inclusion engineering in medium Mn steels: effect of hot-rolling process on the deformation behaviors of oxide and sulfide inclusion* / Y. Wang, Y. Yang, Z. Dong, J. H. Park, Z. Mi, X. Mao, and W. Mu // *Metallurgical and Mater. Transact. B.* – 2022. – **53**, № 4. – P. 2182–2197. DOI: 10.1007/s11663-022-02517-2
2. *On the mechanical properties and deformation mechanisms of manganese sulphide inclusions* / C. F. Kusche, J. S.-L. Gibson, M. A. Wollenweber, and S. Korte-Kerzel // *Mater. and Design.* – 2020. – 193(2). – Article number 108801. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108801
3. *Influence of non-metallic inclusions on local deformation and damage behavior of modified 16MnCrS5 steel* / F. Qayyum, M. Umar, V. Elagin, M. Kirschner, and F. Hoffman // *Crystals.* – 2022. – **12**, № 2. – P. 281–288. DOI: 10.3390/cryst12020281
4. *Compositions evolution and deformation of different non-metallic inclusions in a bearing steel during hot rolling* / N. Liu, G. Cheng, L. Zhang, and W. Yang // *J. of Iron and Steel Res. Int.* – 2022. – № 4. – P. 345–352. DOI: 10.1007/s42243-022-00761-z
5. Губенко С. И., Ошкадеров С. П. Неметаллические включения в стали. – К.: Наук. думка, 2016. – 528 с.
https://www.researchgate.net/publication/331639234_Nemetalliceskie_vklucenia_v_stali
6. Yoshida S. Physical meaning of physical-mesomechanical formulation of deformation and fracture // *AIP Conf. Proc.* – 2010. – **1301**, № 1. – P. 146–155. DOI: 10.1063/1.3526608

7. *Role of nonmetallic inclusions in premature stress-corrosion fracture of drill pipes* / E. I. Kryzhanovsky, H. M. Nykyforchyn, O. Z. Student, H. V. Krechkovska, and I. I. Chudyk // *Material Science*. – 2020. – **55**, № 6. – P. 822–830. DOI: 10.1007/s11003-020-00375-4
8. *Sensitivity of puddled steels to stress corrosion cracking and estimation of their state with using electrochemical parameters* / G. Lesiuk, J. A. F. O. Correia, H. V. Krechkovska, G. Pekalski, A. M. P. de Jesus, and O. Student // *Structural Integrity*. – 2021. – **15**, № 55. – P. 55–93. DOI: 10.1007/978-3-0303-43710-7
9. *Case studies: Structural, Fractographic and mechanical aspects of the steels degradation of the hyperboloid gridshell towers* / G. Lesiuk, J. A. F. O. Correia, H. V. Krechkovska, G. Pekalski, A. M. P. de Jesus, and O. Student // *Structural Integrity*. – 2021. – **15**, № 95. – P. 95–125. DOI: 10.1007/978-3-0303-43710-7_4
10. *André Luiz Vasconcellos daCosta e Silva*. The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications // *J. of Mater. Res. and Technol.* – 2019. – № 8. – P. 2408–2422. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.01.009
11. *Бельченко Г. И., Губенко С. И.* Неметаллические включения и качество стали. – К.: Техника, 1980. – 168 с. <https://b.eruditor.link/file/2377307/>
12. *Pickering F. B. J. and Met A.* Some influence of mechanical working on the deformation of non-metallic inclusions // *J. Iron and Steel Inst.* – 1958. – **189**, № 2. – P. 148–159. <https://onlinebooks.library.upenn.edu/webbin/serial?id=jironsteelinst>
13. *Evolution of oxide and sulfide inclusions during the production of an Al-killed free-cutting steel* / H. Wei, X. Gao, Q. Ren, and L. Zhang // *Metallurgical Res. and Technol.* – 2022. – **119**, № 6. – Article number 609. DOI: 10.1051/metal/2022093
14. *Inclusion evolution in solid steel during rolling deformation: a review* / Y. Yang, D. Zhan, G. Qiu, A. Xiaoming, X. Li, Z. Jiang, and H. Zhang // *J. of Mater. Res. and Technol.* – 2022. – **18**. – P. 5103–5115. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.05.018
15. *Deformation and fracture of non-metallic inclusions in steel at different temperatures* / W. Yang, K. Peng, L. Zhang, and Q. Qiang Ren // *J. of Mater. Res. and Technol.* – 2020. – **9**, № 6. – P. 15016–15022. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.10.066
16. *Honeycombe R. W. K.* The plastic deformation of metals. – Cambridge: Edward Arnold Publ., 1968. – 405 p. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2802643>
17. *Gubenko S. I.* Plasticity origin of heterophase inclusions at steel forming // *Steel in Translation*. – 2020. – **50**, № 10. – P. 730–739. DOI: 10.3103/S0967091220100046
18. *Gubenko S. I. and Parusov E. V.* Influence of eutectic-type inclusions on the red brittleness of steels // *Materials Science*. – 2023. – **58**, № 6. – P. 731–739. DOI: 10.1007/s11003-023-00723-0

Одержано 30.01.2024