

СТАРІННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ, ОТРИМАНОЇ ТЕПЛОЮ ГВИНТОВОЮ ЕКСТРУЗІЄЮ

Показано, що нагрів до 300 °С призводить до «зникнення» пластин цементиту. Цей факт не є нормальним, бо ці ефекти спостерігаються при підвищених температурах поблизу лінії фазового перетворення. Це відбувається через розчинення вуглецю у феритній матриці при високих температурах. У цьому випадку температура нагрівання становить 300 °С і це далеко від 723 °С. Ці факти можуть бути пояснені в припущенні, що в досліджуваній сталі, обробленій теплою гвинтовою екструзією, вуглець дифундує у ферритну матрицю при більш низькій температурі (300 °С), і це призводить до «зникнення» пластин цементиту. Результатом цього є однорідна структура фериту, перенасичена вуглецем в нерівноважному стані.

Ключові слова: низьковуглецева сталь, гвинтова екструзія, структура, властивості, старіння.

Попередні дослідження показали [1, 2], що зсувні деформації призводять до формування особливої структури, що відрізняється високим вмістом більшекутових меж зерен і низькою щільністю дислокацій у тілі феритного зерна. Інтерес до таких структур викликаний тим, що це дозволяє досягти унікальних поєднань властивостей [2, 3], таких як висока міцність і пластичність. Зміни структури в чистих металах при зсувних деформаціях вивчаються досить активно [1, 2]. Проте механізми зміни структури в складних сплавах, якими є сталі, ще мало вивчені. Це і визначає актуальність цих досліджень, що стосуються поведінки надлишкових фаз у маловуглецевій сталі при зсувних деформаціях.

Нашими ранніми дослідженнями [5–9] виявлено, що інтенсивна пластична деформація маловуглецевої сталі 20Г2С методом теплої гвинтової екструзії призводить до розчинення вуглецю у феритній матриці і до зміни морфології цементиту з пластинчастого на глобулярну. Вміст вуглецю у феритній матриці зростає в 1,4 рази, спостерігається зменшення цементитної складової Fe_3C з 20 до 6 % і зменшення текстурованості структури матеріалу. Встановлено, що тепла гвинтова екструзія призводить до подрібнення неметалевих включень (Fe_3Si) з 2 мкм до 30 нм. Однак на цей момент немає досліджень змін структури і властивостей цієї сталі при старінні під час подальшої експлуатації. Старіння в маловуглецевих низьколегованих сталях припускає наявність деякої залишкової пластичної деформації та/або нагрівання до невисоких температур. Саме поєднання цих факторів забезпечує термодифузійні умови старіння.

Добре відомо, що одним із проявів граничних станів металокопструкцій, які працюють в інтервалі температур 100–400 °С, є так звана деградація механічних властивостей металу [10]. Зазвичай це виражається в зниженні характеристик пластичності, може спостерігатися як підвищення так і зниження міцності. Наприклад, у роботах [6, 7] пониження тріщиностійкості в маловуг-

лецевих і низьколегованих сталях пов'язують з сегрегацією домішок по межах феритних зерен і з утворенням карбідних фаз. Старіння негативно позначається на експлуатаційних і технологічних властивостях багатьох сталей. Воно може протікати в будівельних і мостових сталях, що піддаються пластичній деформації при згинанні, монтажі, зварюванні і, посилюючись окрихчуванням при низьких температурах, стати причиною руйнування конструкції.

У цьому зв'язку в цій роботі зроблено спробу розглянути можливі механізми деградації властивостей маловуглецевої низьколегованої сталі 20Г2С після теплої гвинтової екструзії і старіння при різних температурах.

Методика експерименту

Як метод, який дозволяє реалізовувати зсувні деформації, використовувалася гвинтова екструзія [5], яка дозволяє протискати призматичну заготовку через матрицю з гвинтовим каналом. При цьому геометричні розмітки заготовки не змінюються, що дозволяє накопичувати великі ступені деформації. ГЕ здійснювали при температурі заготовки 400 °С і температурі оснастки 320 °С. Тиск пресування не перевищував 1200 МПа, прикладений протитиск становив 100 МПа. Величина одиничного ступеня деформації за один прохід $e \approx 2$, а накопичена деформація за три проходи – $e \approx 6$. Старіння здійснювалося в печі SNOL 6,7/1300 L при температурах 100–400 °С.

Структурний аналіз сталі 20Г2С після теплої гвинтової екструзії. Структурний аналіз показав, що тепла гвинтова екструзія маловуглецевої сталі призводить до фрагментації структурних складових як фериту, так і перліту. За даними сканувальної електронної мікроскопії (рис. 1) показано, що середній розмір перлітних колоній зменшується з $(15 \pm 1,5)$ мкм до $(5 \pm 0,5)$ мкм, при цьому змінюється морфологія цементиту. Відбувається трансформація цементиту з пластинчастого в глобулярний (рис. 1, б, з). Це обумовлено зсувними напруженнями при ГЕ.

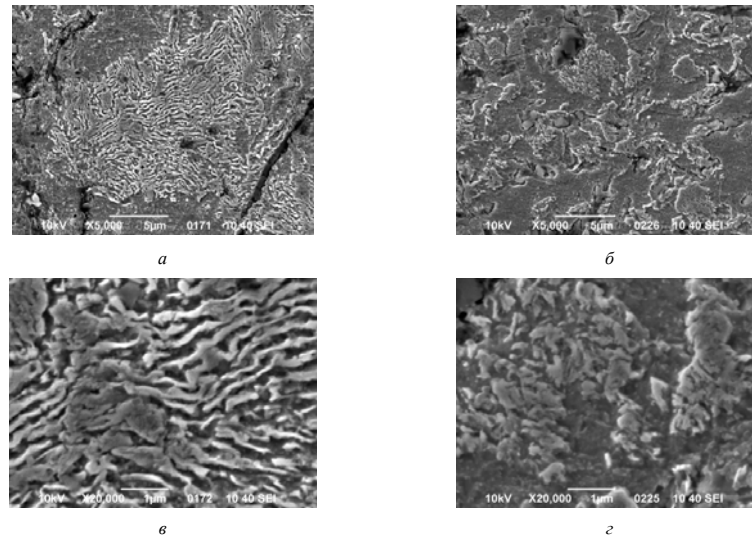


Рис. 1. Мікроструктура маловуглецевої сталі 20Г2С, сканувальна електронна мікроскопія: а, в – початковий стан; б, г – після гвинтової екструзії, е = 6

За даними енергодисперсійного і ДЗЕ аналізу встановлено, що відбувається перерозподіл легувальних компонентів (С, Mn) у фазах, змінюється співвідношення фаз. Питома частка цементитної фази (Fe_3C) зменшилася з 20 % до 6 %. Вміст вуглецю у феритній матриці зростає в 1,4 рази, а концентрація марганцю в межах похибки залишається незмінною.

Це пояснюється різною рухливістю легувальних елементів, тому, що енергія активації дифузії С менша ніж у Mn, а коефіцієнт самодифузії і швидкість вища. Простий зсув, реалізований ГЕ, сприяє активному перерозподілу легувальних елементів і масопереносу за рахунок інтенсифікації руху дефектів.

Установлено, що тепла гвинтова екструзія призводить до подрібнення неметалевих включень (Fe_3Si) з 2 мкм до 30 нм, що підтверджується як даними рентгеноструктурного аналізу, так і даними сканувальної електронної мікроскопії та трансмісійної електронної мікроскопії (рис. 2).

Вимірювання показали, що структурні зміни, які сформовані теплою ГЕ, приводять до збільшення мікротвердості в 1,5 рази (1550 ± 150 МПа в початковому стані, 2250 ± 225 МПа після теплої ГЕ).

Таким чином виявлено, що інтенсивна пластична деформація маловуглецевої сталі 20Г2С методом теплої гвинтової екструзії призводить до розчинення вуглецю в феритній матриці і до зміни морфології цементиту з пластинчастого на глобулярний. Вміст вуглецю у феритній матриці зростає в 1,4 рази, спостерігається зменшення цементитної складової Fe_3C з 20 до 6 %. Встановлено, що тепла гвинтова екструзія призводить до подрібнення неметалевих включень (Fe_3Si) з 2 мкм до 30 нм.

Структурний аналіз сталі 20Г2С після теплої гвинтової екструзії і старіння. Під старінням зазвичай розуміють зміну властивостей сталі, які протікають у часі без помітної зміни мікроструктури.

Однак у нашому випадку при створенні умов термомодеформаційного старіння помітні зміни не тільки властивостей, а й структури металу, оскільки попередня тепла гвинтова екструзія створила нерівноважний структурний стан через високий вміст вуглецю у феритній матриці.

Вочевидь, що старіння може реалізуватися внаслідок зміни розчинності вуглецю і марганцю в α -залізі при підвищенні температури. Зазвичай вважається

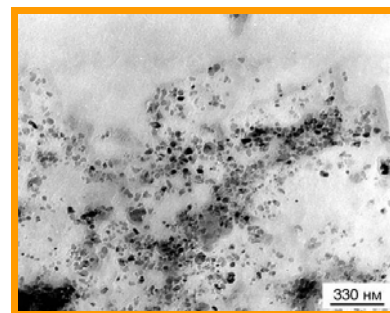
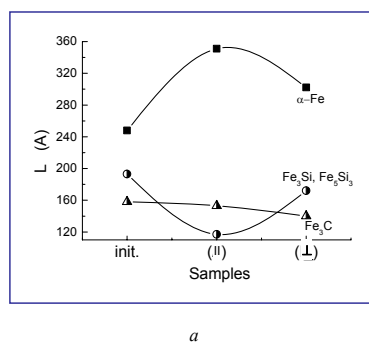


Рис. 2. Подрібнення надлишкових фаз у маловуглецевій сталі 20Г2С при гвинтової екструзії: а – дані рентгеноструктурного аналізу, де L – розмір виділень Fe_3Si у паралельному та перпендикулярному перетинах щодо осі деформації, б – дані просвічувальної електронної мікроскопії

[11–15], що якщо в сталях при попередній термічній обробці був зафіксований пересичений α -розчин (як наприклад при зварюванні, охолодженні тонкого листа після прокатки та ін.), то при наступній її витримці при нормальній температурі (природне старіння) або при підвищеній (50...100 °С) температурі відбувається розпад твердого розчину з виділенням третинного цементиту у вигляді дисперсних частинок. Якщо в матеріалі створена висока щільність дислокацій, то при невеликих нагрівах на першому етапі відбувається зміцнення, що пов'язано, в основному, з погіршенням умов руху дислокацій і утворенням карбідних і нітридних предвиділень і виділень при нагріванні. Термічне і деформаційне старіння підвищують міцність та твердість, але одночасно різко знижують ударну в'язкість і підвищують поріг хладноломкості. На другому етапі спостерігається деяке укрупнення цих виділень і втрата ними когерентності меж, що призводить до зменшення рівня твердості.

На рис. 3 представлена мікроструктура сталі 20Г2С, отримана за допомогою оптичного мікроскопа після ГЕ і після старіння при різних температурах.

Аналіз зміни структури показав, що після ГЕ і відпуски при 150 °С перлітні колонії мають складну форму роздроблених острівців, розташованих переважно на межах зерен фериту. Сам ферит має викривлену пластичною деформацією форму і характеризується різнозернистістю. Розмір зерен відрізняється більш ніж у 2 рази (порівняти розмір зерен 7,5 мкм і 17,5 мкм). На рис. 4 наведено частотний розподіл зерен за розмірами, який показує наявність двох максимумів, що підтверджує наявність різнозернистості.

Викривлена форма феритних зерен успадкована після обробки теплою гвинтовою екструзією, а збільшення деяких зерен пов'язано зі змінами, які почалися при відпуску 150 °С. Слід зазначити, що зазвичай

при такій температурі відбуваються тільки процеси стоку точкових дефектів, для зміни розмірів і форми зерен, як правило, потрібні температури понад 300 °С [14]. Однак ці дані наводяться для традиційних способів обробки сталей, таких як прокатка, кування, осадка. Для сталей, оброблених методами інтенсивної пластичної деформації (прокатка із зсувом, гвинтова екструзія, крутіння в ковадлах Бріджмена, рівноканальнекутове пресування), сформована нерівноважна дислокаційна структура [1] і, значить, здатна до змін при невеликих нагрівах. Існують дослідження, які показують що, матеріали при таких обробках реагують на низькотемпературні нагріви від 50 °С і вище [2].

Пояснення такої поведінки матеріалу може критися в особливостях дефектної структури після ГЕ. Раніше нами було показано [11], що формування такої структури може призводити до інтенсифікованого руху дефектів, що виражається на мікрорівні в переміщенні деяких меж зерен. Подібні аномальні ефекти збільшення окремих зерен спостерігали також інші автори [13, 14].

Нагрівання до 300 °С призводить до «зникнення» цементитних пластин. Цей факт неординарний, тому зазвичай подібні ефекти спостерігаються при підвищених температурах поблизу лінії фазового перетворення. Це пов'язано з розчиненням вуглецю у феритній матриці при високих температурах. У цьому ж випадку температура нагріву становить всього 300 °С і вона далеко від 723 °С. Подібний факт можна пояснити з припущення, що в досліджуваній сталі, обробленій теплою ГЕ, вуглець дифундує у феритну матрицю при більш низькій температурі (300 °С), і це призводить до «зникнення» пластин цементиту. В результаті утворюється однорідна (рис. 4, б) феритна структура, пересичена вуглецем до нерівноважного стану. Добре відомо, що рівноважний стан твердого розчину вуглецю в α -залізі при кімнатній температурі відповідає граничній

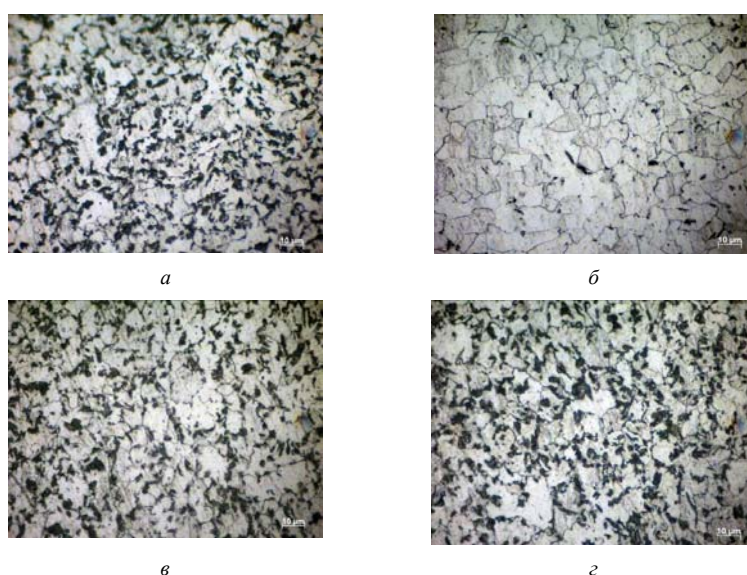


Рис. 3. Мікроструктура сталі 20Г2С після теплої ГЕ та старіння при температурах: а – 150, б – 300, в – 350, з – 400 °С

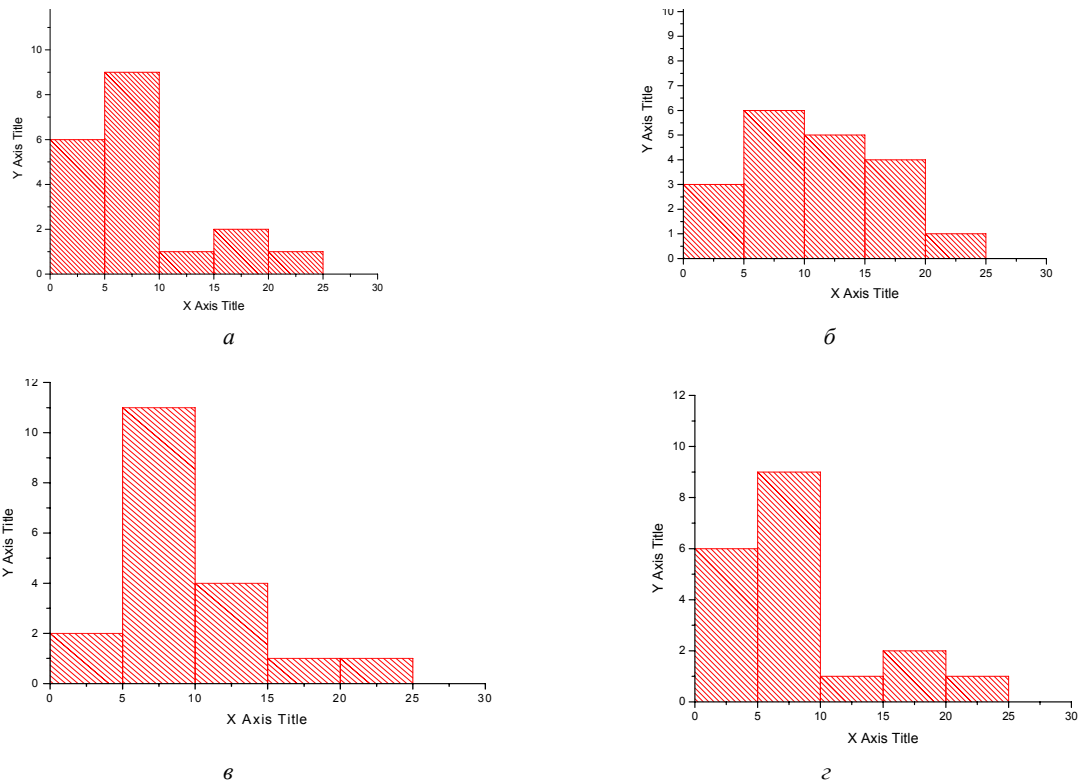


Рис. 4. Частотний розподіл розмірів зерен сталі 20Г2С після теплої ГЕ і старіння при температурах:

a – 150, $б$ – 300, $в$ – 350, $г$ – 400 °С

концентрації 0,02 ваг.% [14]. На цей момент залишається відкритим питання: в якій формі і на яких дефектах може виділятися вуглець. Найімовірніше він повинен утворювати атмосфери навколо дислокаційних скупчень, але може бути, що він збагачує також зони стику більшокутових меж зерен або нанопори, якщо такі сформовані. Більш точні відомості про розташування вуглецю в пересиченому твердому розчині в сталі після теплої ГЕ можуть бути отримані тільки при проведенні прецизійних досліджень надалі.

Проте останнім часом в літературі з'явилися відомості про подібні спостереження іншими авторами. Наприклад, у роботах [13] визначено, що при деяких режимах термомеханічної обробки в сталі можна створити досить значне пересичення вуглецю. Як відомо, рівноважна концентрація вуглецю в решітці фериту при кімнатній температурі надзвичайно мала, проте ще в класичній монографії А. П. Гуляєва [14] зазначалося, що нерівноважна концентрація вуглецю у фериті за деяких умов обробки може на порядок перевищувати рівноважну і досягати ~ 0,15 ваг.%. Останні дослідження показують, що в умовах інтенсивної пластичної деформації нерівноважна концентрація вуглецю в залізі може досягати 0,5 ваг.%.

Розглянемо, що відбувається з досліджуваною сталлю при нагріванні до 350°C. Розгляд оптичних фотографій мікроструктури показує, що структура знову складається з суміші ферито-перлітних фаз, що дуже схоже

на структуру матеріалу після ГЕ+відпуск при 150 °С. Однак після такого нагріву перлітні колонії не прив'язані строго до кордонів зерен, а також розташовуються і в об'ємі феритного зерна (рис. 3, в.)

Зазвичай для пересиченого розчину вуглецю в α -залізі, що сформувався в результаті використання істотно нерівноважних режимів термомеханічної обробки, з плином часу розпадається з виділенням часток карбідів. Процес є двохетапним: I етап – дифузія атомів вуглецю до меж зерен; II етап – утворення і зростання часток карбідів. У маловуглецевих дрібнозернистих сталях вуглець іде на межі зерен, і саме тому утворюються зерномежні карбіди [15]. Це пояснюється тим, що дефекти кристалічної будови в цьому випадку в основному згруповані поряд з межею. У нашому ж випадку (ШД обробки) спостерігається виділення цементиту не тільки в прив'язці до меж, а й в об'ємі зерна. Це побічно дозволяє судити про наявність дефектів кристалічної будови всередині зерна.

Подальший нагрів до 400 °С дозволяє отримати якісно таку ж картину розподілу фаз з однією відмінністю. А саме, спостерігається вибіркового ріст деяких зерен, про що і говорить бімодальна діаграма розподілу зерен за розмірами (рис. 3, г).

Зміна рівня мікротвердості і середнього розміру зерна (табл. 1) підтверджує ситуацію, що обговорювалася вище, з розчиненням вуглецю при відпуску 300 °С, тому зафіксовано зниження рівня мікротвердості до

Таблиця 1 – Мікротвердість і середній розмір зерна сталі 20Г2С після теплої гвинтової екструзії і відпуску

Температура, °С	Мікротвердість, МПа	Середній розмір зерна, мкм
20	1500±30	25±5
150	2568±46	10±3
300	2090±45	11±5
350	2332±120	9±5
400	2253±130	8±5

2090 МПа. При підвищенні температури відпуску до 350–400 °С та спостережуваному виділенні надлишкових фаз в об'ємі зерна фіксується зростання мікротвердості до 2253–2332 МПа, але ці значення все ж таки менші від значень мікротвердості після ГЕ, поєднаної з відпуском при температурі 150 °С (порівняти з 2568 МПа). Зменшення «удаваного» середнього розміру зерна також пов'язане з цими процесами виділення надлишкових фаз в об'ємі зерна.

Таким чином показано, що нагрівання до 300 °С призводить до «зникнення» цементитних пластин. Цей факт не звичайний, тому що подібні ефекти спостерігаються при підвищених температурах поблизу лінії фазового перетворення і передують самому фазовому перетворенню. Це пов'язано з розчиненням вуглецю в феритній матриці при високих температурах. У цьому ж випадку температура нагріву становить всього 300 °С і вона далека від 723 °С. Подібний факт можна пояснити з припущення, що в досліджуваній сталі, обробленої теплою ГЕ, вуглець дифундує у феритну матрицю при більш низькій температурі (300 °С), і це призводить до «зникнення» пластин цементиту. У результаті утворюється однорідна феритна структура, перенасичена вуглецем до нерівноважного стану.

Висновки

1. Виявлено, що інтенсивна пластична деформація маловуглецевої сталі 20Г2С методом теплої гвинтової екструзії призводить до розчинення вуглецю у феритній матриці і до зміни морфології цементиту з пластинчастого на глобулярний. Вміст вуглецю у феритній матриці зростає в 1,4 рази, спостерігається зменшення цементитної складової Fe₃C з 20 до 6%.

2. Установлено, що тепла гвинтова екструзія призводить до подрібнення неметалевих включень (Fe₃Si) з 2 мкм до 30 нм, що внесені у сталь завдяки процесу виплавки. Це дає можливість одержати після інтенсивної деформації більш дрібні (на два порядки) неметалеві включення та збільшити робочий ресурс виробів із такої сталі.

3. Показано, що проведення низькотемпературних нагрівів сталі 20Г2С після теплої ГЕ дає можливість регулювання рівня мікротвердості на ±500 МПа за рахунок розчинення-виділення надлишкових фаз.

4. Отримані знання можуть бути застосовані на прак-

тиці при необхідності подальшої термомеханічної обробки чи при зварюванні субмікрокристалічної маловуглецевої сталі після гвинтової екструзії.

Автор вважає своїм обов'язком висловити подяку колегам з Донецького фізико-технічного інституту ім. О.О.Галкіна НАН України - д.т.н. Пашинській О.Г., к.ф.-м.н. Ткаченко В.М., Глазуновій В.О. та Бурховецькому В.В. за допомогу в проведенні досліджень.

Список літератури

1. Valiev RZ Nanostructured materials produced by severe plastic deformation / RZ Valiev, IV Alexandrov. – М. : Logos, 2000. – 272 p.
2. Pashinskaya EG Physical and mechanical bases of structure refinement combined with plastic deformation / EG Pashinskaya. – Donetsk : Weber, 2009. – 352 p.
3. Estrin Y. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science / Y. Estrin, A. Vinogradov // Acta Materialia. – 2013. – Vol. 61. – P. 782–817.
4. Dobatkin S. Nano- and submicrocrystalline steels processed by severe plastic deformation / S. Dobatkin // FTVD. – 2008. – Vol. 18, № 4. – P. 36–50.
5. Beigelzimer YE Twist Extrusion - the accumulation of strain / YE Beigel'zimer, VN Varyukhin, DV Orlov, SG Synkov. – Donetsk Company «ТЕАН», 2003. – 87 p.
6. Pashinskaya EG The effect of deformation and shear on the microstructure and mechanical properties of steel St.3 / EG Pashinskaya, MM Myshlyayev, SY Mironov, V. Varyukhin // Physics of Metals and Metallography. – 2008. – T. 105, № 1. – С. 86–94.
7. Pashinskaya EG Opportunities backscattered electron diffraction method for studying the structure of deformed steel / EG Pashinskaya, VN Varyukhin, AV Zavdoveev, VV Burhovetsky, VA Glazunov // Deformation and fracture of materials. – 2012. – № 6. – С. 35–40.
8. Pashinskaya EG Influence of deformation scheme simple shift in the structure of the low-carbon steel / EG Pashinskaya, AV Zavdoveev // Resource-saving technologies of production and processing of materials in mechanical pressure, collection of scientific papers. – 2012. – Vol. 13, № 1. – С. 134–140.
9. Pashinska E. Mechanisms of structure formation in low-carbon steel at warm twist extrusion / E. Pashinska, V. Varyukhin, S. Dobatkin, A. Zavdoveev // Emerging Materials Research. – 2013. – Vol. 2, issue EMR3. – P. 139–143.
10. Gevlich SO On the mechanisms of degradation of the

- properties low-alloy steels / SO Gevlich, SA Pegisheva // Vestnik TSU. – 2005. – Vol. 7, Vol. 1. – P. 193–196.
11. Rahshtadt AG Spring steels and alloys / AG Rahshtadt. – M. : Metallurgy, 1971. – 496 p.
12. KV Chuistov Aging metal alloys / KV Chuistov. – Kiev : Naukova Dumka, 1985. – 232 p.
13. Vinogradov YM Wear-resistant materials in chemical engineering: Reference / YM Vinogradov. – L. : Mashinostoenie, 1977. – 256 p.
14. AP Gulyaev Metallography / AP Gulyaev. – M. : Engineering, 1986. – 544 p.
15. Korshunov LG Structural transformations in friction and wear resistance of austenitic steels / LG Korshunov // Phys. – 1992. – № 8. – P. 3–21.

Одержано 06.04.2015

Завдовеев А.В. Старение низкоуглеродистой стали, полученной теплой винтовой экструзией

Показано, что нагрев до 300 °С приводит к «исчезновению» пластин цементита. Этот факт не является нормальным, потому что эти эффекты наблюдаются при повышенных температурах вблизи линии фазового превращения. Это происходит из-за растворения углерода в ферритной матрице при высоких температурах. В этом случае температура нагрева составляет 300 °С и это далеко от 723 °С. Эти факты могут быть объяснены в предположении, что в исследуемой стали, обработанной с теплой винтовой экструзией, углерод диффундирует в ферритной матрице при более низкой температуре (300 °С), и это приводит к «исчезновению» пластин цементита. Результатом этого есть однородная структура феррита, перенасыщенная углеродом в неравновесном состоянии.

Ключевые слова: малоуглеродистая сталь, винтовая экструзия, структура, свойства, старение.

Zavdoveev A. Low carbon steel aging after warm twist extrusion (TE)

It is shown that heating to 300 °C leads to the «disappearance» of cementite plates. This fact is not normal, because these effects are observed at elevated temperatures near the line of phase transformation. This is due to the dissolution of carbon in ferrite matrix at high temperatures. In this case, the heating temperature is 300 °C and it is far from 723 °C. These facts can be explained on the assumption that in the investigated steel treated with warm TE, carbon diffuses into the ferritic matrix at a lower temperature (300 °C), and this leads to the «disappearance» of cementite plates. As result there is homogeneous ferritic structure, supersaturated with carbon at non-equilibrium state.

Key words: low-carbon steel, twist extrusion, structure, properties, aging.