Metalozn. obrobka met. 2019, т. 91, сс. 16-22
https://doi.org/10.15407/mom2019.03.016

УДК 669.14.017: 620.18: 665-15-194.2

Вплив режимів відпуску на параметри тонкої структури, напруження і твердість сталі 25Х2М1Ф

С. В. Бобирь, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, svbobyr07@gmail.com
Г. В. Левченко, доктор технічних наук, професор, завідуючий лабораторією
А. Ю. Борисенко, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Н. О. Куцева*, кандидат технічних наук, доцент

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Дніпро
*Дніпропетровський національний університет, Дніпро

Наведено результати досліджень про вплив режимів відпуску на параметри тонкої структури, напруження і твердість сталі 25Х2М1Ф. Показано, що вторинна твердість сталі 25Х2М1Ф, відпущеної при температурі 550 °С, максимальна після 5 год відпускання і обумовлена найменшими розмірами блоків кристалічної решітки. Встановлено, що на початкових стадіях розпаду пересиченого твердого α-розчину загартованої сталі 25Х2М1Ф при температурі 550 °С відбувається зростання параметрів кристалічної решітки. Протягом наступного часу відпускання зв'язаність кристалічних решіток зазначених фаз порушується, через відділення карбідних частинок від α-фази і параметр а кристалічної решітки α-фази зменшується.

Ключові слова: *сталь, тонка структура, параметр кристалічної решітки, твердість, напруження, відпускання.*

Деталі, що працюють в умовах циклічного теплового впливу, часто виходять з ладу через термовтомне спрацювання. Для підвищення термостійкості деталей, що зазнають вплив циклічних теплових навантажень, таких як прошивних оправок трубопрокатного стану, велике значення має правильне призначення режиму термічної обробки. Остаточний комплекс властивостей сталь для виготовлення інструменту гарячої деформації набуває після гартування і відпуску, що сприяють виникненню значних напружень у мікрооб'ємах деталі та впливають на її твердість та термостійкість [1, 2].

Вже давно встановлено, що при легуванні сталі такими елементами як молібден, ванадій, титан і вольфрам, зміна твердості при відпуску має зовсім інший характер порівняно з вуглецевою сталлю [3]. Після відпуску в області температур 100 – 400 °С в таких сталях твердість знижується. При подальшому підвищенні температури твердість підвищується. В області

температур 500 – 600 °С досягається максимум, потім твердість знижується. Підвищення твердості при 500 – 600 °С прийнято називати вторинним твердненням. Деякі дослідники пояснюють вторинне тверднення формуванням спеціального карбіду [4, 5]. Підвищення твердості в цьому випадку пояснюється дисперсністю часток цього карбіду, яка максимальна на початковій стадії його утворення. Відповідно до цієї точки зору коагуляція карбіду при підвищенні температури є причиною зниження твердості. Інші дослідники пов'язують вторинне тверднення з перетворенням залишкового аустеніту в тверду α-фазу [6].

Тому дослідження впливу режимів відпуску на параметри тонкої структури, напруження і твердість сталі 25Х2М1Ф, що використовується для виготовлення інструменту гарячої деформації, має як теоретичне, так і практичне значення.

У даній роботі дослідження проведено на зразках легованої сталі 25Х2М1Ф після нормалізації (нагрів і витримки 15 хв при температурі 950 °С, охолодження на повітрі) і подальшого відпуску при температурах 500, 550 і 600 °С протягом 1, 5 і 9 годин. Вивчення процесів, що відбуваються в сталі 25Х2М1Ф після нормалізації і відпуску, виконували рентгенографічним методом.

Результати вимірювання твердості зразків наведено на рис. 1.

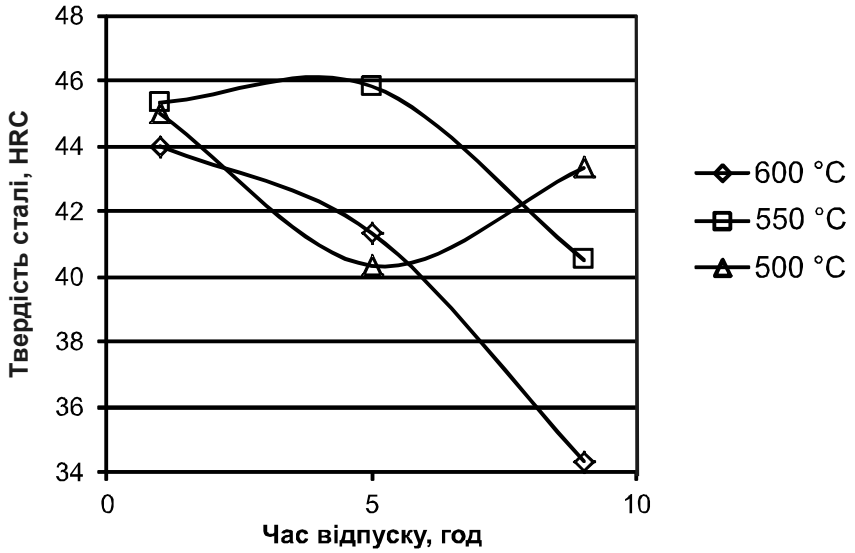


Рис. 1. Залежність твердості сталі 25Х2М1Ф після нормалізації при 950 °С від температури і тривалості відпуску.

Дослідження сталі 25Х2М1Ф показало, що вторинна твердість в ній вища твердості загартованої сталі. Це означає, що в сталях з малим вмістом вуглецю бейніт не розпадається до температури 500 °С. Вище цієї температури дифузія легуючих елементів стає інтенсивнішою, внаслідок чого бейніт розпадається з утворенням цементиту і спеціального карбіду. Підвищення твердості після відпуску при 500 – 550 °С, що спостерігається

в сталях, легованих ванадієм, молібденом і титаном, обумовлено утворенням в результаті розпаду твердого розчину і відповідних дисперсних карбідів [3] (рис. 2).

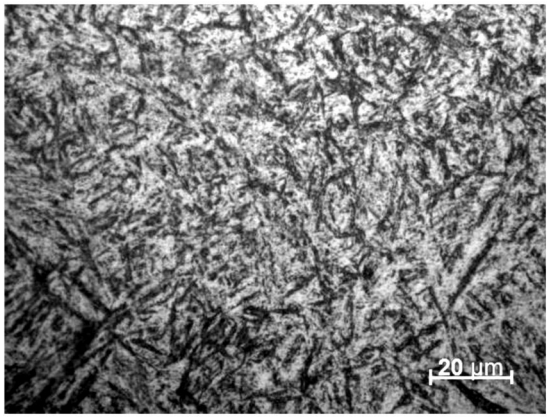


Рис. 2. Структура сталі 25Х2М1Ф після відпуску при температурі 550 °С протягом 5 годин.

Природа і процес формування карбідної фази відобра-жаються на зміні стану α-твердого розчину. На рис. 3 показана зміна розмірів блоків тонкої кристалічної структури в сталі 25Х2М1Ф залежно від температури і часу відпуску. Після відпуску при 550 °С протягом 5-9 годин розмір блоків кристалічної решітки фериту сталі є мінімальним, визначаючи високі когерентні напруження і високу твердість сталі.

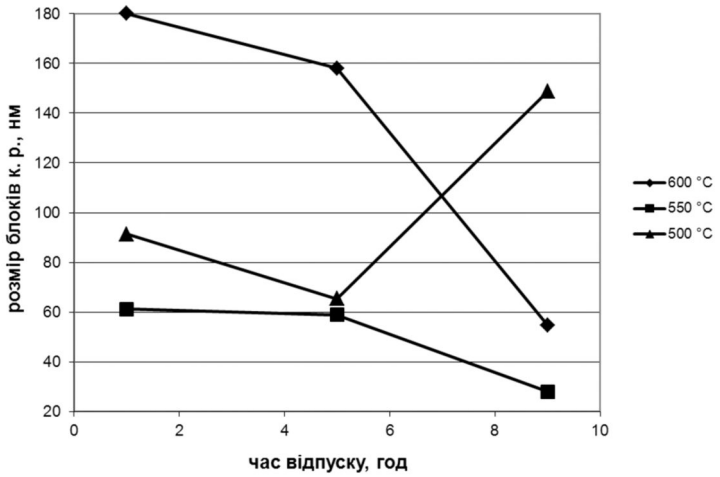


Рис. 3. Вплив температури і часу відпуску на розмір блоків тонкої кристалічної структури сталі 25Х2М1Ф.

Одночасно на рентгенограмі з'являється одна лінія спеціального карбіду. Отже, така зміна стану твердого α-розчину пов'язана з початковою стадією виділення карбіду VC. Зазначені зміни властивостей і структури ванадієвої сталі можна інтерпретувати на підставі аналізу внутрішніх напружень сталі.

Для вуглецевих сталей когерентні напруження, що виникають на початкових стадіях формування цементиту, будуть менші, ніж напруження, що з'являються при утворенні спеціального карбіду. Це може бути обумовлено більш сильними міжатомними зв'язками в кристалічній решітці спеціального карбіду, ніж в решітці цементиту. Тому підвищення твердості при температурі 550 °С (рис. 2) може бути пов'язано, по-перше, з підвищенням цих когерентних напружень, і, по-друге, з дисперсійними напруженнями.

В роботі [3] встановлено, що знехрупчування перлітних сталей при відпуску обумовлено зростанням викривлень в мікрообластях – напруженнями II роду, тобто накопиченням недосконалостей кристалічної будови в процесі розпаду пересиченого твердого α-розчину. Роль внутрішніх напружень в зміні крихкості можна представити таким чином. Пружно викривлені мікрообласті при додаванні зовнішнього навантаження стають концентраторами напружень і можуть стати зародками тріщин. За досить великих зовнішніх і внутрішніх напруженнях ці зародки розвиваються в тріщини, спричиняючи крихкому руйнуванню.

Це підтверджують результати дослідження зміни величини мікроспотворень і параметра (*a*) кристалічної решітки при відпуску сталі 25Х2М1Ф (рис. 4).

З рис. 4 а видно, що величина мікроспотворень в сталі 25Х2М1Ф після відпускання може мати значну величину, сприяючи знехрупчуванню сталі. Найбільш несприятливим в цьому відношенні є відпуск при 600 °С протягом 1 години.

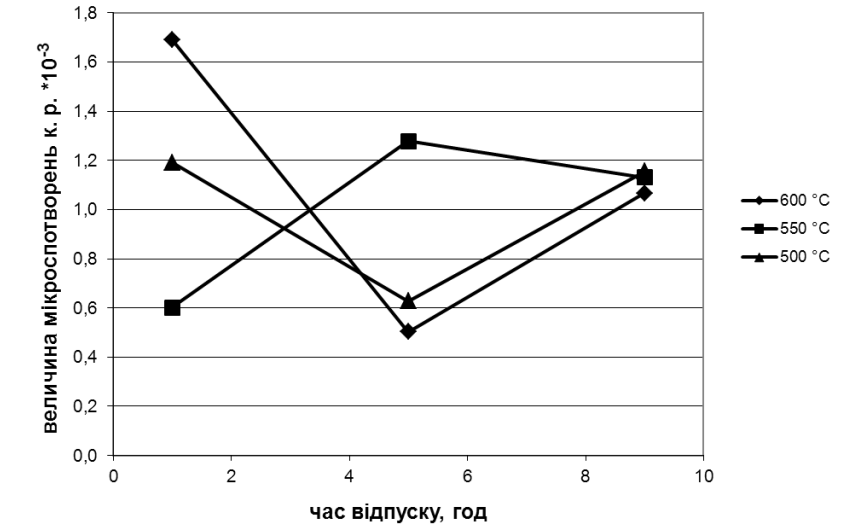
При відпуску 550 °С 5 год спостерігається збільшення внутрішніх спотворень і параметра *a* кристалічної решітки на відміну від вуглецевої сталі, в якій з підвищенням температури спотворення решітки прогресивно зменшуються.

На початкових стадіях розпаду пересиченого твердого α-розчину загартованої сталі при температурі 550 °С 5 годин відбувалося збільшення параметрів кристалічної решітки через утворення надлишкової фази, когерентної з матрицею. При цьому збільшення параметрів а і визначалося зростанням ступеню атомно-кристалічної невідповідності на межі розподілу фаз. Протягом наступного часу відпуску зв'язаність кристалічних решіток зазначених фаз порушувалася, через відділення карбідних частинок від α-фази і параметр кристалічної решітки α-фази зменшувався.

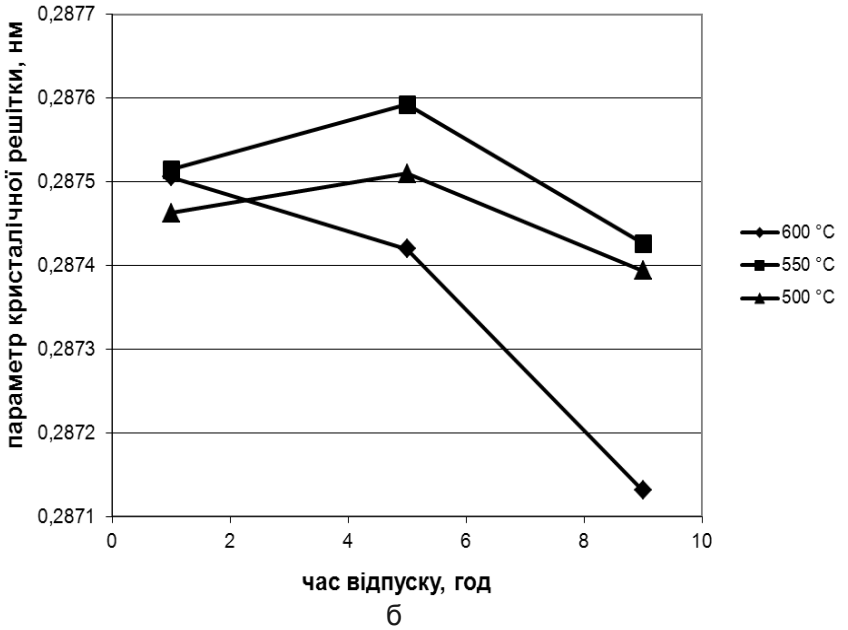
З рис. 4 б видно, що найбільше зменшення параметра кристалічної решітки відбувається при температурі відпуску сталі 600 °С внаслідок дифузії вуглецю, хрому і ванадію з твердого α-розчину в карбіди.

Зневіцнення сталі 25Х2М1Ф при температурі 600 °С корелює зі зменшенням параметра кристалічної решітки і відбувається в результаті порушення пов'язаності решітки карбіду VC з решіткою матриці, коагуляції частинок цього карбіду і зниженням параметра кристалічної решітки α-фази.

На підставі наведених вище результатів можна вважати, що основний вплив на крихкість і твердість при відпусканні сталі 25Х2М1Ф після



а



б

Рис. 4. Зміна величини мікроспотворень $\frac{\Delta a}{a}$ (а) і параметра a кристалічної решітки (б) при відпусканні сталі 25Х2М1Ф.

нормалізації мають не гартівні, а вторинні напруження – когерентні (визначені за розміром блоків) і дисперсійні, що визначаються за величиною мікровикривлень кристалічної решітки.

Висновки Показано, що вторинна твердість сталі 25Х2М1Ф при температурі 550 °С максимальна після 5 год відпускання і обумовлена зменшенням розмірів блоків кристалічної решітки через когерентні напруження, що виникають на початкових стадіях формування спеціального

карбіду (VC). При температурі 500 °С твердість підвищується тільки після 9 год відпускання, що можна пояснити уповільненням дифузійних процесів утворення спеціальних карбідів при цій температурі.

Встановлено, що на початкових стадіях розпаду пересиченого твердого α-розчину загартованої сталі 25Х2М1Ф при температурі 550 °С протягом 5 годин відбувається зростання параметрів a і $\frac{\Delta a}{a}$ кристалічної решітки через утворення надлишкової фази (VC), когерентної з матрицею. Протягом наступного часу відпуску (9 год.) зв'язаність кристалічних решіток зазначених фаз порушується, через відділення карбідних частинок від α- фази і параметр a кристалічної решітки α-фази зменшується.

Показано, що значну роль у зміні крихкості і твердості при відпусканні сталі 25Х2М1Ф після нормалізації грають вторинні напруження – когерентні (визначені розміром блоків) і дисперсійні (визначаються за величиною мікроспотворень).

Література

1. Винокур Б.Б., Пилюшенко В.Л. Прочность и хрупкость конструкционной легированной стали. – Киев: Наукова думка, 1983. – 283 с.
2. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1983. – 528 с.
3. Лысак Л.Н., Николин Б.Н. Физические основы термической обработки стали. – К.: Техніка, 1986 – 304 с.
4. Устиновщиков Ю.И. Причины возникновения хрупкости в процессе высокого отпуска хромистых сталей // ФММ. – 1977. – № 44. – С.146-151.
5. Бобирь С.В., Нефедьева Е.Е., Евсюков М.Ф. Особенности фазово-структурных превращений при охлаждении хромистых сталей для инструмента горячей деформации // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2014. – Вып. 29. – С. 221-228.
6. Малинов Л.С., Бурова Д.В., Малышева И.Е. Получение хорошего комплекса механических свойств и износостойкости у стали 25Х1М1Ф, позволяющее расширить области ее применения // Матеріали Міжнар. науково-техн. Конф.: тези доповіді, 16-17 травня 2019 р. – Маріуполь, 2019. – Т. 1. – С. 108-109.

References

1. Vynokur B.B.,Pyliushenko V.L. *Prochnost y khrupkost konstruktsyonnoi lehyrovannoi staly* (Strength and Fragility of Structural Alloy Steel),Kyev: Naukova dumka, 1983, 283 p. [in Russian].
2. Heller Yu. A. *Ynstrumentalnyie staly* (Tool steels),Moskva: Metallurhyia,1983,528p. [in Russian].
3. Lyisak L.N., Nykolyn B.N. *Fyzycheskye osnovyi termycheskoi obrabotky staly* (Physical foundations of heat treatment of steel), Kyev: Tekhnika, 1986, 304 p. [in Russian].
4. Ustynovshchykov Yu.Y., *FMM*, 1977, No 44, pp.146-15 [in Russian].
5. Bobyr S.V., Nefedeva E.E., Evsiukov M.F., *Fundamentalnyie y prykladnyie problemyi chernoi metallurhyy*, 2014, Vol. 29, pp. 221-228. [in Russian].

6. Malynov L.S.,Burova D.V.,Malyisheva Y.E. Mizhnarodna naukovo-tekhnichna Konferensiya (International scientific and technical conference), Abstracts of Papers, May 16 – 17, 2019, Mariupol, 2019, T. 1, pp. 108-109. [in Russian].

Одержано 17.09.19

С.В. Бобырь, Г.В. Левченко, А.Ю. Борисенко, Н.А. Куцева

Влияние режимов отпуска на параметры тонкой структуры, напряжения и твердость стали 25Х2М1Ф

Резюме

Приведены результаты исследований о влиянии режимов отпуска на параметры тонкой структуры, напряжения и твердость стали 25Х2М1Ф. Показано, что вторичная твердость стали 25Х2М1Ф, отпущенной при температуре 550 °С, максимальная после 5 часов отпуска и обусловлена наименьшими размерами блоков кристаллической решетки. Установлено, что на начальных стадиях распада пересыщенного твердого α-раствора закаленной стали 25Х2М1Ф при температуре 550 °С происходит рост параметров кристаллической решетки. В течение последующего времени отпуска связанность кристаллических решеток указанных фаз нарушается, через отделения карбидных частиц от α-фазы и параметр (*a*) кристаллической решетки α-фазы уменьшается.

Ключевые слова: сталь, тонкая структура, параметр кристаллической решетки, твердость, напряжение, отпуск

S. V. Bobyr, G. V. Levchenko, A. Yu. Dorisenko, N. O. Kutseva

Influence of tempering modes on fine structure parameters, stress and hardness of 25Cr2Mo1V steel

Summary

The results of studies on the effect of tempering regimes on the parameters of fine structure, stress and hardness of 25Cr2Mo1V steel are presented. It is shown that the secondary hardness of steel 25Cr2Mo1V,tempered at a temperature of 550 °C,maximum after 5 hours release and is due to the smallest block size of the crystal lattice. It is established that in the initial stages of decay of the supersaturated solid α-solution of hardened 25X2M1F steel at 550 °C,the crystal lattice parameters increase. During the next tempering time, the bonding of the crystal lattices of these phases is broken, due to the separation of the carbide particles from the α-phase and the parameter and the crystal lattice of the α-phase decreases.

Keywords: steel, fine structure, crystal lattice parameter, hardness, stress, release.